



**TUGAS AKHIR - TM091486 (Desain)**

# **PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI YANG DIHASILKAN MEKANISME VIBRATION ENERGY HARVESTING DENGAN EKSITASI GETARAN PADA ENGINE**

**GANDHA HAFESHA**  
**NRP. 2109 100 139**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT**

**S1- Regular**  
**Lab. Sistim Dinamis dan Vibrasi**  
**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2014**



**FINAL PROJECT - TM091486 (Desain)**

# **MODELING AND ANALYSIS OF MECHANISM OF ENERGY GENERATED BY VIBRATION ENERGY HARVESTING WITH EXCITED VIBRATIONS FROM ENGINE**

**GANDHA HAFESHA**  
**NRP. 2109 100 139**

**Academic Supervisor**  
**Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT**

**S1- Regular**  
**Lab. System of Dynamic and Vibration**  
**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2014**

**PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI YANG DIHASILKAN  
MEKANISME VIBRATION ENERGY HARVESTING DENGAN  
EKSITASI GETARAN PADA ENGINE**

**Tugas Akhir**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik

Pada Bidang Studi Konversi Energi

S-1 Jurusan Teknik Mesin


Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh

**Gandha Hafesha**

**NRP. 2109 100 139**

<b>Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT.</b>	 .....(Pembimbing)
<b>Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng.</b>	 .....(Penguji I)
<b>Ir. J. Lubi</b>	 .....(Penguji II)
<b>Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA</b>	 .....(Penguji III)

**Surabaya**

**Juli 2014**

---

## **PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI YANG DIHASILKAN MEKANISME *VIBRATION ENERGY* *HARVESTING* DENGAN EKSITASI GETARAN PADA *ENGINE***

**Nama Mahasiswa : Gandha Hafesha**  
**NRP : 2109 100 139**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT**

### **ABSTRAK**

Krisis energi telah menjadi masalah dunia. Semakin bertambahnya jumlah manusia, semakin besar pula jumlah energi yang dibutuhkan. Sementara sumber energi, seperti: minyak bumi, gas alam, dan batu bara, merupakan sumber energi yang tidak dapat terbarukan. Sehingga, jumlah sumber energi ini, dari waktu ke waktu semakin menipis. Masalah inilah yang kemudian mendorong banyak teknisi untuk melakukan penghematan dan pemanfaatan energi yang terbuang sia sia terutama dibidang transportasi.

Sebelum dilakukan pemodelan, dirumuskan persamaan gerak dari mekanisme. Setelah itu dibutuhkan data-data teknis mesin yang selanjutnya dapat digunakan dalam pemodelan matematis sistem. Kemudian dilakukan analisa berdasarkan prinsip mekanika getaran. Persamaan gerak yang didapatkan dimasukkan kedalam software matlab-simulink untuk mendapatkan respon getaran yang dihasilkan oleh *multilayer piezoelectric*.

Dari grafik perbandingan respon yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa model 3( $\theta = 60^\circ$ ) menghasilkan energi listrik terbesar. Semakin besar sudut miring dari besi pendorong ( $\theta$ ), maka semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh *multilayer piezoelectric*.

***Kata kunci: Getaran, Piezoelectric, Simulink***

---

## **MODELING AND ANALYSIS OF MECHANISM OF ENERGY GENERATED BY VIBRATION ENERGY HARVESTING WITH EXCITED VIBRATIONS FROM ENGINE**

**Name : Gandha Hafesha**  
**NRP : 2109100139**  
**Department : Mechanical Engineering FTI-ITS**  
**Advisor Lecture : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT**

### **ABSTRACT**

The energy crisis has become a world problem. The increasing number of people, the greater the amount of energy required. While sources of energy, such as petroleum, natural gas, and coal, an energy source that can not be renewable. Thus, the amount of this energy source, from time to time are running low. The problem is then pushed a lot of technicians to make savings and utilization of the energy wasted in vain, especially in transportation.

Prior to modeling, formulated the equations of motion of the mechanism. After the required technical data engine then be used in the mathematical modeling of the system. Then analyzed by the principle of vibration mechanics. The equation of motion obtained incorporated into the software matlab-simulink to obtain the vibration response generated by the piezoelectric multilayer.

Comparison of the response of the graph obtained, we can conclude that model 3 ( $\theta = 60^\circ$ ) produces the largest electric

energy. The greater the oblique angle of the driving iron ( $\theta$ ), the greater the power generated by piezoelectric multilayer.

**Keywords: Vibration, Piezoelectric, Simulink.**

## **KATA PENGANTAR**

Assalamu'alaykum wr.wb

Segala puji bagi Allah Robb Semesta Alam dan Dia tidak memiliki sekutu dalam penciptaan alam ini. Kemudian sholawat dan salam tidak lupa penulis ucapkan untuk Rosulullah SAW beserta para keluarga, sahabat, dan pengikut beliau hingga akhir zaman.

Syukur walhamdulillah atas karunia Allah sehingga penulis diberi kemampuan dan kekuatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

### **PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI YANG DIHASILKAN MEKANISME VIBRATION ENERGY HARVESTING DENGAN EKSITASI GETARAN PADA ENGINE**

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis menghanturkan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng, selaku dosen wali dan dosen penguji yang memberikan arahan kepada penulis selama melaksanakan perkuliahan di jurusan teknik mesin ITS.
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT, selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.



3. Ir. J. Lubi dan Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, selaku dosen penguji yang memberikan banyak arahan dan masukan serta kritikan dalam penyelesaian tugas akhir.
4. Seluruh dosen yang tidak dapat disebutkan namanya satu persatu yang pernah memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Keluarga besar saya di Sumatera Barat terutama Ibunda Zulkaffiarti, Ayahanda Salim Haryanto, Abang Rangga Harkaffi, Kakak Lovy Furi Tias Ningrum, dan Adek saya Shara Hazubi yang telah memberikan motivasi dan dorongan serta doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir di Teknik Mesin ITS ini.
6. Teman-teman M-52 sekalian yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu yang telah bersedia menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kelemahan dan membutuhkan penyempurnaan. Oleh sebab itu masukan dari semua pihak penulis harapkan demi sempurnanya tugas akhir ini. Akhirnya penulis menaruh secuil harapan, semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Wassalamu'alaykum wr. Wb.

Surabaya, 22 Agustus 2014

Penulis

---

## **DAFTAR ISI**

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN</b> .....	xvii
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3 BATASAN MASALAH .....	2
1.4 TUJUAN PENELITIAN .....	3
1.5 MANFAAT PENELITIAN .....	3
 <b>BAB II KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.2 DASAR TEORI .....	8
2.2.1 MEKANIKA GETARAN .....	8
2.2.1.1 Derajat Kebebasan .....	9
2.2.1.2 Gerak Harmonik .....	10
2.2.1.3 Getaran Bebas dan Getaran Paksa .....	12
2.2.2 PIEZOELECTRIC .....	14
2.2.2.1 Elemen Piezoelectric .....	14
2.2.2.2 Piezoelectric Constants .....	15
2.2.2.3 Analisa Material Piezoelectric .....	25
2.2.2.3.1 Single Layer Piezoelectric .....	25
2.2.2.3.2 Multi Layer Piezoelectric .....	27

2.2.2.3.3 Susunan Piezoelectric.....	30
2.2.2.3.4 Analisa Dinamis Piezoelectric.....	34
2.2.3 MATLAB SIMULINK.....	36
2.2.3.1 MATLAB .....	36
2.2.3.2 SIMULINK.....	38

### **BAB III METODOLOGI**

3.1 TAHAPAN PENELITIAN.....	41
3.2 PENJELASAN.....	42
3.2.1 STUDI LITERATUR.....	42
3.2.2 IDENTIFIKASI PERMASALAHAN.....	42
3.2.3 PERMODELAN.....	43
3.2.4 SIMULASI.....	46
3.2.5 ANALISA.....	47
3.2.6 KESIMPULAN.....	48

### **BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN**

4.1 ANALISA.....	49
4.1.1 MODEL 1.....	49
4.1.1.1 Mekanisme Model 1.....	49
4.1.1.2 Hasil Simulasi.....	55
4.1.1.2.1 Analisa Grafik Displacement Terhadap Waktu.....	55
4.1.1.2.2 Analisa Grafik Kuat Arus yang Dihasilkan Terhadap Waktu.....	56
4.1.1.2.3 Analisa Grafik Daya yang Dihasilkan Terhadap Waktu.....	57
4.1.2 MODEL 2.....	58
4.1.2.1 Mekanisme Model 2 ( $\theta = 45^\circ$ atau $\theta = 60^\circ$ ).....	58
4.1.2.2 Hasil Simulasi.....	65
4.1.2.2.1 Analisa Grafik Displacement Terhadap Waktu $\theta = 45^\circ$ .....	65

---

4.1.2.2.2	Analisa Grafik Kuat Arus yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 45^\circ$ .....	66
4.1.2.2.3	Analisa Grafik Daya yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 45^\circ$ .....	67
4.1.2.2.4	Analisa Grafik Displacement Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	68
4.1.2.2.5	Analisa Grafik Kuat Arus yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	69
4.1.2.2.6	Analisa Grafik Daya yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	70
4.1.3	MODEL 3 .....	72
4.1.3.1	Mekanisme Model 2 ( $\theta = 45^\circ$ atau $\theta = 60^\circ$ ) .....	72
4.1.3.2	Hasil Simulasi .....	79
4.1.3.2.1	Analisa Grafik Displacement Terhadap Waktu $\theta = 45^\circ$ .....	79
4.1.3.2.2	Analisa Grafik Kuat Arus yang Dihasilkan Terhadap waktu $\theta = 45^\circ$ .....	80
4.1.3.2.3	Analisa Grafik Daya yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 45^\circ$ .....	81
4.1.3.2.4	Analisa Grafik Displacement Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	84
4.1.3.2.5	Analisa Grafik Kuat Arus yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	85
4.1.3.2.6	Analisa Grafik Daya yang Dihasilkan Terhadap Waktu $\theta = 60^\circ$ .....	86
4.2	PEMBAHASAN .....	89
4.2.1	ANALISA PERBANDINGAN RESPON (RMS) YANG DIHASILKAN OLEH MODEL 1, 2, DAN 3 .....	89

---

## **BAB V PENUTUP**

5.1 KESIMPULAN.....	93
5.2 SARAN.....	93

<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>xix</b>
----------------------------	------------

<b>BIOGRAFI PENULIS.....</b>	<b>xx</b>
------------------------------	-----------

---

## **DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 2.1</b>	Analogi gaya-tegangan.....	33
<b>Tabel 2.2</b>	Analogi gaya-arus.....	33
<b>Tabel 2.3</b>	Tabel perbandingan respon yang dihasilkan oleh model 1, 2, dan 3 .....	89
<b>Tabel 4.2</b>	Tabel perbandingan efisiensi dari mekanisme model 1, 2, dan 3.....	92

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Hasil perbandingan grafik daya P .....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Grafik perbandingan daya P untuk variasi amplitudo terhadap masing-masing variasi frekuensi.....	6
<b>Gambar 2.3</b>	Grafik perbandingan daya P untuk variasi frekuensi terhadap masing-masing variasi amplitudo.....	6
<b>Gambar 2.4</b>	Mekanisme pegas dengan beban pada ujungnya.	9
<b>Gambar 2.5a</b>	Sistem dengan 1 DOF ( <i>Single Degree of Freedom</i> ).....	10
<b>Gambar 2.5b</b>	Sistem <i>Multi</i> DOF dengan Dua Derajat Kebebasan .....	10
<b>Gambar 2.6</b>	Rekaman Gerak Harmonik .....	11
<b>Gambar 2.7</b>	Proyeksi Gerak Harmonik Pada Lingkaran.....	12
<b>Gambar 2.8</b>	Getaran bebas .....	13
<b>Gambar 2.9</b>	Getaran paksa .....	14
<b>Gambar 2.10</b>	Lembaran PZT .....	15
<b>Gambar 2.11</b>	Definisi arah pada elemen <i>Piezoelectric</i> .....	16
<b>Gambar 2.12</b>	Spesifikasi <i>piezoelectric</i> .....	24
<b>Gambar 2.13</b>	Gaya mekanik dari <i>piezoelectric</i> .....	25
<b>Gambar 2.14</b>	Gaya <i>electric</i> dari <i>piezoelectric</i> .....	26
<b>Gambar 2.15</b>	Multilayer <i>piezoelectric</i> .....	27
<b>Gambar 2.16</b>	Gaya mekanik pada multilayer <i>piezoelectric</i> ...	27
<b>Gambar 2.17</b>	Multilayer <i>piezoelectric</i> jika disusun secara paralel.....	29
<b>Gambar 2.18</b>	Multilayer <i>piezoelectric</i> jika disusun secara seri .....	30
<b>Gambar 2.19</b>	Contoh MATLAB .....	38
<b>Gambar 2.20</b>	Model sederhana Simulink.....	39
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir tugas akhir secara global.....	41
<b>Gambar 3.2</b>	Model 1 .....	43

<b>Gambar 3.3</b>	Model 1 dalam 3D.....	44
<b>Gambar 3.4</b>	Model 2 .....	44
<b>Gambar 3.5</b>	Model 2 dalam 3D.....	45
<b>Gambar 3.6</b>	Model 3 .....	45
<b>Gambar 3.7</b>	Model 3 dalam 3D.....	46
<b>Gambar 3.8</b>	Grafik penjumlahan gaya eksitasi respon <i>bouncing</i> dan <i>picting</i> pada variasi panjang <i>connecting rod</i> pertama ( $L_1=115,6$ mm) untuk 1000 rpm .....	47
<b>Gambar 3.9</b>	Grafik penjumlahan kecepatan respon <i>bouncing</i> dan <i>picting</i> pada variasi panjang <i>connecting rod</i> pertama ( $L_1=115,6$ mm) untuk 1000 rpm .....	47
<b>Gambar 4.1a</b>	Model 1 .....	49
<b>Gambar 4.1b</b>	Keseimbangan gaya pada model 1 .....	49
<b>Gambar 4.1c</b>	Keseimbangan gaya pada M-L <i>piezoelectric</i> jika diberikan gaya eksitasi .....	49
<b>Gambar 4.2</b>	Blok diagram dari model 1.....	52
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik gaya eksitasi terhadap waktu .....	54
<b>Gambar 4.4</b>	Blok diagram Simulink MATLAB model 1.....	54
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik <i>displacement multilayer piezoelectric</i> terhadap waktu .....	55
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu	56
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu ...	57
<b>Gambar 4.8</b>	Model 2 .....	58
<b>Gambar 4.9</b>	Keseimbangan gaya pada model 2 .....	59
<b>Gambar 4.10</b>	Blok diagram dari model 2.....	62
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik gaya eksitasi terhadap waktu .....	64
<b>Gambar 4.12</b>	Blok diagram Simulink MATLAB model 2.....	64
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik <i>displacement multilayer piezoelectric</i> terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	65
<b>Gambar 4.14</b>	Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	66
<b>Gambar 4.15</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	67



<b>Gambar 4.16</b>	Grafik <i>displacement multilayer piezoelectric</i> terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	68
<b>Gambar 4.17</b>	Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	69
<b>Gambar 4.18</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	70
<b>Gambar 4.19</b>	Model 3 .....	72
<b>Gambar 4.20</b>	Keseimbangan gaya pada model 3 .....	72
<b>Gambar 4.21</b>	Blok diagram dari model 3 .....	76
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik gaya eksitasi terhadap waktu .....	78
<b>Gambar 4.23</b>	Blok diagram Simulink MATLAB model 3.....	78
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik <i>displacement multilayer piezoelectric</i> terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	79
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	80
<b>Gambar 4.26</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ dengan gaya eksitasi bernilai positif... ..	81
<b>Gambar 4.27</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ dengan gaya eksitasi bernilai negatif.. ..	82
<b>Gambar 4.28</b>	Grafik gabungan daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 45^\circ$ .....	82
<b>Gambar 4.29</b>	Grafik <i>displacement multilayer piezoelectric</i> terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	84
<b>Gambar 4.30</b>	Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	85
<b>Gambar 4.31</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ dengan gaya eksitasi bernilai positif... ..	86
<b>Gambar 4.32</b>	Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ dengan gaya eksitasi bernilai negatif.. ..	86
<b>Gambar 4.33</b>	Grafik gabungan daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk $\Theta = 60^\circ$ .....	87

---

**Gambar 4.34** Grafik perbandingan nilai RMS respon dari model  
1,  $2(\theta = 45^\circ)$ ,  $2(\theta = 60^\circ)$ ,  $3(\theta = 45^\circ)$ , dan  
 $3(\theta = 60^\circ)$  ..... 89

---

## DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

$A$	: Luas penampang <i>piezoelectric</i> (m <sup>2</sup> )
$d_{33}$	: <i>Piezoelectric Charge Constant</i>
$\epsilon_{33}$	: <i>Dielectric constant</i>
$F_a$	: Gaya eksitasi (N)
$F_e$	: Gaya elektrik <i>multilayer piezoelectric</i> (N)
$F_m$	: Gaya mekanik (N)
$k_t$	: Koefisien pegas multilayer piezoelectric model 1 (N/.m)
$kpzt_2$	: Koefisien pegas multilayer piezoelectric model 2 (N/.m)
$kpzt_3$	: Koefisien pegas multilayer piezoelectric model 3 (N/.m)
$M$	: Massa besi pendorong model 1 (kg)
$m_2$	: Massa besi pendorong 1 model 2 (kg)
$M_2$	: Massa besi pendorong 2 model 2 (kg)
$m_3$	: Massa besi pendorong 1 model 3 (kg)
$M_3$	: Massa besi pendorong 2 model 3 (kg)
$m_{pzt}$	: Massa <i>multilayer piezoelectric</i> model 1 (kg)

---

$m_{pzt2}$	: Massa <i>multilayer piezoelectric</i> model 2(kg)
$m_{pzt3}$	: Massa <i>multilayer piezoelectric</i> model 3 (kg)
$n$	: Jumlah lapisan <i>multilayer piezoelectric</i>
$N$	: Faktor penghubung elektrik-mekanik
$\rho_{besi}$	: Massa jenis besi (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{pzt}$	: Massa jenis <i>piezoelectric</i> (kg/m <sup>3</sup> )
$Q$	: Muatan listrik (C)
$\dot{Q}$	: Kuat arus (Ampere)
$R$	: Hambatan alat pengukur (ohm)
$t$	: Ketebalan <i>piezoelectric</i> (meter)
$V_{besi}$	: Volume besi Pendorong (m <sup>3</sup> )
$V$	: Voltase yang dihasilkan massa M-L PZT
$V_c$	: Voltase <i>capacitance</i> pada elemen PZT
$V_R$	: Voltase yang digunakan/ melewati <i>load resistance</i> R
$\Theta$	: Sudut massa pendorong
$Y$	: Modulus Young (N/m <sup>2</sup> )

---

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 LATAR BELAKANG

Krisis energi telah menjadi masalah dunia. Semakin bertambahnya jumlah manusia, semakin besar pula jumlah energi yang dibutuhkan. Sementara sumber energi, seperti: minyak bumi, gas alam, dan batu bara, merupakan sumber energi yang tidak terbarukan. Sehingga, jumlah sumber energi ini, dari waktu ke waktu semakin menipis. Masalah inilah yang kemudian mendorong banyak teknisi untuk melakukan penghematan dan pemanfaatan energi yang terbuang terutama dibidang transportasi.

Salah satu alat transportasi adalah mobil. Berdasarkan Badan Pusat Statistik, jumlah mobil penumpang pada tahun 2011 adalah 9.548.866 unit. Ini membuktikan bahwasanya penggunaan kendaraan mobil sangat besar di Indonesia. Sehingga tidak heran, para teknisi berusaha melakukan penghematan energi pada mobil, guna memperkecil energi yang terbuang.

Getaran pada mobil adalah salah satu contoh energi yang terbuang. Mesin yang bergetar akibat terjadinya pembakaran merupakan hal yang tidak bisa dihindari saat seseorang menggunakan mobil. Beberapa metode dilakukan untuk memanfaatkan energi yang terbuang ini. Sebagai contoh adalah metode yang menggunakan medan magnet (*electromagnetic*), regangan material (*piezoelectric*), atau medan listrik (*electrostatic*).

Pada penelitian ini, energi getaran pada mesin mobil diubah oleh sebuah mekanisme yang bergerak naik turun untuk menekan *multilayer piezoelectric* yang disusun paralel. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya regangan dan rapatan pada

---

*multilayer piezoelectric*. Sehingga mengakibatkan timbulnya beda potensial pada kedua sisi piezo dan menghasilkan energi listrik yang bermanfaat. Mekanisme ini dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakan software MATLAB untuk ditentukan berapa besar energi yang dihasilkan oleh mekanisme ini apabila dipasangkan pada mesin mobil.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Adapun perumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Merancang dan memodelkan beberapa mekanisme yang menggunakan metode *multilayer piezoelectric* yang disusun paralel.
2. Mensimulasikan mekanisme – mekanisme untuk menghasilkan energi listrik.
3. Membandingkan energi listrik yang dihasilkan mekanisme – mekanisme tersebut untuk mendapatkan rancangan mekanisme yang baik.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Gerakan osilasi yang diberikan bernilai konstan.
2. Material piezo yang digunakan c.6 (soft ceramics) yang dianggap bernilai konstan dan homogen.
3. Gaya gesek mekanisme diabaikan.
4. R dari mekanisme =  $100 \Omega$ .
5. Dampak pengeleman terhadap kemampuan *multilayer piezoelectric* menghasilkan energi listrik diabaikan.

## 1.4 TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Merancang, memodelkan, dan mensimulasikan beberapa mekanisme yang menggunakan metode *multilayer piezoelectric* yang disusun paralel.
2. Mendapatkan rancangan mekanisme multilayer piezoelectric yang dapat menghasilkan energi listrik yang besar.

## 1.5 MANFAAT PENELITIAN

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Mengetahui mekanisme yang dapat menghasilkan energi listrik dari *multilayer piezoelectric* yang disusun paralel.
2. Mengetahui mekanisme yang dapat menghasilkan energi listrik yang paling besar.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



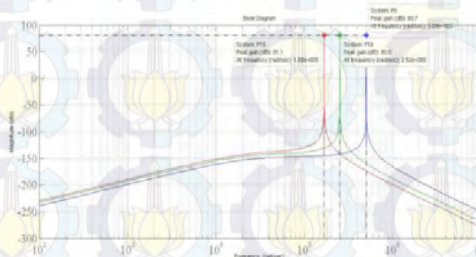
## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

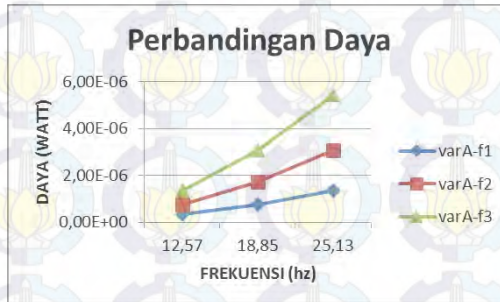
Pada tahun 2012, Vika Ririyani pada tugas akhir yang berjudul “*Permodelan dan Analisa Energy yang Dihasilkan Mekanisme Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting (VEH)*” melakukan penelitian terhadap material *piezoelectric* yang digunakan untuk mengubah energi getaran menjadi energi listrik. Material *piezoelectric* yang mendapatkan tegangan atau regangan akan menghasilkan energi listrik. Sebagai upaya untuk mendapatkan energi yang lebih besar, maka dibuat permodelan *multilayer piezoelectric*. Pembahasan yang dilakukan pada *multilayer piezoelectric* yang disusun seri dan paralel. Kemudian masing – masing susunan diberikan variasi jumlah *layer*, amplitudo dan frekuensi.

Parameter yang divariasikan adalah jumlah *layer piezoelectric* sebanyak 5 layer, 10 layer, dan 15 layer. Untuk nilai amplitudonya sebesar 0,05 m; 0,075 m; dan 0,1 m. Serta nilai frekuensi sebesar 2 Hz, 3 Hz, dan 4 Hz.



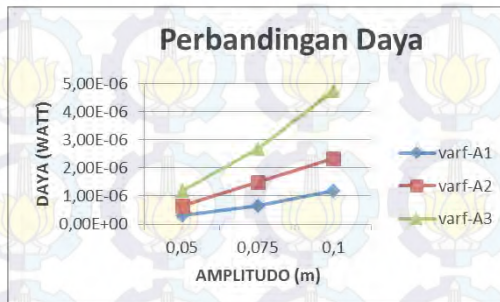
**Gambar 2.1** Hasil Perbandingan Grafik Daya P

Dari gambar 2.1 diketahui bahwa variasi jumlah *layer* pada rangkaian paralel menunjukkan bahwa semakin bertambah jumlah *layer* maka daya yang dihasilkan semakin tinggi.



**Gambar 2.2** Grafik perbandingan daya  $P$  untuk variasi amplitudo terhadap masing-masing variasi frekuensi

Dari analisa gambar 2.2 diperoleh kesimpulan bahwa semakin bertambahnya nilai amplitudo pada *multilayer piezoelectric*, maka semakin bertambah pula nilai daya.



**Gambar 2.3** Grafik perbandingan daya  $P$  untuk variasi frekuensi terhadap masing-masing variasi amplitudo

Kemudian dari analisa gambar 2.3 dapat disimpulkan bahwa semakin bertambahnya nilai frekuensi pada *multilayer piezoelectric*, maka semakin bertambah pula nilai daya.

Pada tahun 2012, Yulia Yohanna Latumeten pada tugas akhirnya yang berjudul “*Pemodelan dan Analisa Respon Getaran Pada Kendaraan Akibat Pengaruh Pemasangan Mekanisme Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting (VEH)*” melakukan penelitian terhadap material *piezoelectric* yang digunakan untuk mengubah energi getaran menjadi energi listrik yang dipasang secara seri dan paralel pada suspensi mobil perkotaan.

Analisa pemodelan yang dilakukan adalah analisa pemodelan karakteristik getaran sistem suspensi dengan penambahan mekanisme VEH yang dipasang secara seri dengan pegas suspensi dan paralel dengan sistem suspensi serta tanpa penambahan mekanisme VEH.

Dari hasil respon getaran diperoleh respon tanpa mekanisme VEH dan mekanisme VEH seri tidak berbeda jauh sedangkan untuk paralel terdapat perbedaan yang signifikan. Besar voltase yang dihasilkan adalah 0,028 volt untuk seri dan 0,025 volt untuk paralel serta daya  $1.1 \times 10^{-4}$  watt untuk seri dan  $0,9 \times 10^{-4}$  watt untuk paralel. Sehingga disimpulkan pemasangan mekanisme VEH secara seri dengan pegas suspensi lebih menguntungkan daripada pemasangan mekanisme VEH secara paralel dengan sistem suspensi.

Pada tahun 2013, Karina Yulia pada tugas akhirnya yang berjudul “*Pemodelan dan Analisa Getaran Motor Bensin 4 Langkah 2 Silinder 650cc Segaris Dengan Sudut Engkol  $0^0$  Untuk Rubber Mount*” melakukan penelitian dengan cara pemodelan untuk membuat motor bensin 4 langkah 2 silinder 650cc segaris.



Dalam pemodelan dibutuhkan data-data teknis mesin yang selanjutnya dapat digunakan dalam pemodelan matematis sistem. Setelah itu dilakukan analisa berdasarkan kinematika dan dinamika mekanisme dan analisa berdasarkan prinsip mekanika getaran. Persamaan gerak yang didapatkan dimasukkan kedalam software matlab-simulink untuk mendapatkan respon getaran (bouncing dan pitching) yang terjadi pada engine.

Dari analisa didapatkan respon getaran berupa acceleration, velocity, dan displacement untuk input impulsif dan periodik. Untuk input impulsif menghasilkan bahwa sistem telah mencapai kestabilan sebelum 0.5 detik baik respon yang berupa acceleration, velocity, dan displacement. Dimana dengan variasi panjang connecting rod tidak begitu mempengaruhi hasil respon acceleration, velocity, dan displacement baik berupa bouncing maupun pitching. Adanya perubahan besarnya kecepatan putaran engine (rpm) memberikan pengaruh yang cukup berarti pada respon getaran berupa acceleration yang terjadi pada engine tersebut, dimana semakin besar nilai rpm maka semakin besar nilai respon.

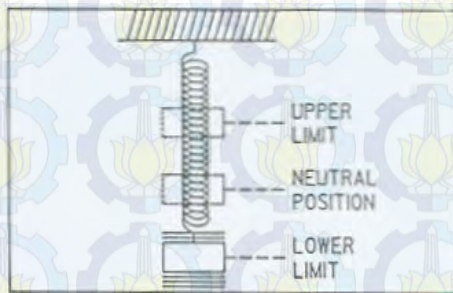
## **2.2 DASAR TEORI**

### **2.2.1 MEKANIKA GETARAN**

Getaran adalah gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangannya. Hal ini bisa dijelaskan dengan mekanisme pegas yang diberi massa pada ujungnya seperti pada gambar 2.8. Setiap komponen mekanikal memiliki berat dan properties yang menyerupai pegas. Ada dua kelompok getaran yang umum yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran bebas terjadi jika sistem berosilasi karena bekerjanya gaya yang ada dalam sistem itu

sendiri atau tidak ada gaya luar yang bekerja. Sistem yang bergetar bebas akan bergetar pada satu atau lebih frekuensi naturalnya

Sedangkan getaran yang terjadi karena adanya gaya(rangsangan) dari luar disebut getaran paksa. Jika rangsangan tersebut beresilasi maka sistem dipaksa untuk bergetar pada frekuensi eksitasinya. Jika frekuensi eksitasi sistem sama dengan frekuensi natural sistem maka sistem akan mengalami resonansi, yang sangat berbahaya dan bisa menghancurkan sistem tersebut.



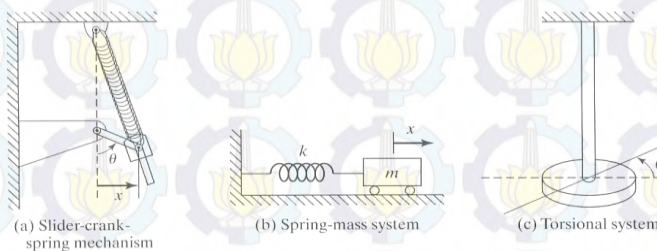
*Gambar 2.4 Mekanisme pegas dengan beban pada ujungnya*

Setiap sistem yang bergetar mengalami redaman sampai derajat tertentu karena energi didisipasi oleh gesekan dan tahanan lain. Jika redaman kecil maka pengaruhnya sangat kecil pada frekuensi natural, dan perhitungan frekuensi natural biasanya dilakukan atas dasar tidak ada redaman.

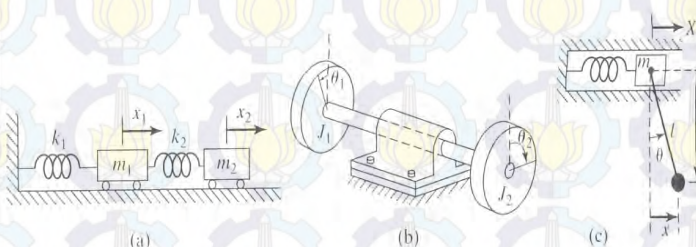
### 2.2.1.1 Derajat Kebebasan

Derajat independensi yang diperlukan untuk menyatakan posisi suatu system pada setiap saat disebut dengan derajat kebebasan atau biasa disebut dengan DOF (*Degree of Freedom*). Jadi suatu partikel bebas yang

mengalami gerak umum dalam ruang akan memiliki tiga derajat kebebasan (sumbu  $x$ , sumbu  $y$  dan sumbu  $z$ ). Sedangkan benda kaku akan mempunyai enam derajat kebebasan, tiga komponen posisi dan tiga sudut yang menyatakan orientasinya. Secara garis besar sistem degree of freedom dibagi menjadi dua yaitu sistem dengan satu derajat kebebasan (1 DOF) dan sistem yang mempunyai derajat kebebasan lebih dari satu (multi DOF). Untuk kedua sistem ini, dapat diperlihatkan contoh gambarnya :



**Gambar 2.5.a** Sistem dengan 1 DOF (Single Degree of Freedom)



**Gambar 2.5.b** Sistem multi DOF dengan dua derajat kebebasan

### 2.2.1.2 Gerak Harmonik

Gerak Osilasi yang berulang dalam selang waktu yang sama ( $\tau$ ), maka disebut gerak periodik. Waktu pengulangan  $\tau$



disebut periode osilasi dan kebalikannya,  $f = \frac{1}{\tau}$  yang disebut frekuensi.

Gerak periodik yang paling sederhana adalah gerak harmonik. Hal ini dapat dijelaskan dengan sebuah massa yang digantung pada sebuah pegas seperti terlihat pada gambar 2.6. Jika massa tersebut dipindahkan dari posisi diam dan dilepaskan, maka massa tersebut akan berosilasi naik turun. Dengan menempatkan suatu sumber cahaya pada massa yang berosilasi, maka geraknya dapat direkam pada suatu keping film peka cahaya yang bergerak pada kecepatan konstan.

$$x = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau}$$



**Gambar 2.6** Rekaman gerak harmonik

Gerakan yang terekam pada film dapat dinyatakan oleh persamaan :  $x = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau}$  dengan A adalah amplitudo atau simpangan terbesar diukur dari posisi setimbang dan, t adalah periode. Gerak diulang pada  $t = \tau$ .

Gerak harmonik dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak melingkar dengan kecepatan konstan terhadap suatu garis lurus seperti ditunjukkan pada gambar 2.11. Dengan kecepatan sudut garis op sebesar  $\omega$ , perpindahan simpangan x dapat dituliskan sebagai :

$$x = A \sin \omega t \dots\dots\dots(2.1)$$

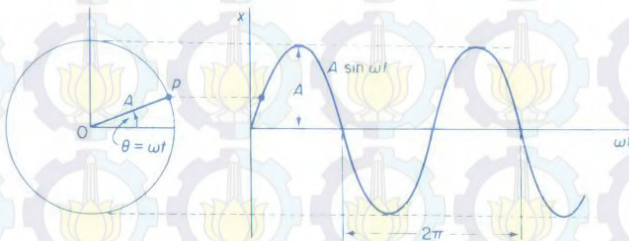
Besaran  $\omega$  diukur dalam radian per detik dan disebut frekuensi lingkaran. Karena gerak berulang dalam  $2\pi$  radian, maka didapat hubungan :

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f \dots\dots\dots(2.2)$$

Kecepatan dan percepatan gerak harmonik dapat diperoleh secara mudah dengan menurunkan persamaan 2.1, sehingga didapat :

$$\dot{x} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \dots\dots\dots(2.4)$$



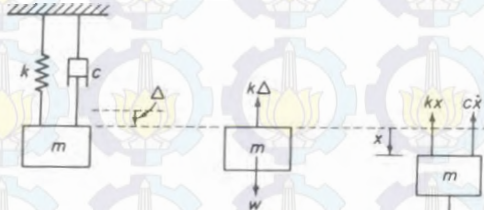
**Gambar 2.7** Proyeksi gerak harmonik pada lingkaran

### 2.2.1.3 Getaran Bebas dan Getaran Paksa

Getaran bebas adalah getaran suatu sistem tanpa adanya gaya dari luar yang memaksa terjadinya getaran, melainkan karena adanya keadaan awal yang diberikan sehingga sistem tersebut bergetar. Getaran bebas dari sistem memenuhi sistem masa dan sifat elastisitas dan pada kondisi awal tidak bekerja eksitasi dari luar.



Pada gambar 2.8 merupakan salah satu contoh sistem dengan satu derajat kebebasan yang mengalami redaman dan dirangsang oleh gaya harmonik :  $F(t)$ .



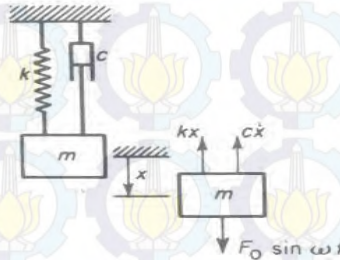
**Gambar 2.8** Getaran bebas

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \dots \dots \dots (2.5)$$

Jika suatu sistem dipengaruhi oleh eksitasi harmonik, maka respon getarannya akan berlangsung pada frekuensi yang sama dengan frekuensi eksitasi. Sumber-sumber eksitasi harmonik bisa berasal dari ketidakseimbangan mesin-mesin yang berputar, gaya-gaya pada mesin torak atau gerak mesin itu sendiri.

Pada gambar 2.9 merupakan salah satu contoh sistem dengan satu derajat kebebasan yang mengalami redaman dan dirangsang oleh gaya harmonik :  $F_0 \sin \omega t$ .



**Gambar 2.9** Getaran Paksa

Dari diagram benda bebasnya, persamaan gerak adalah :  

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \dots\dots\dots(2.6)$$

## 2.2.2 PIEZOELECTRIC

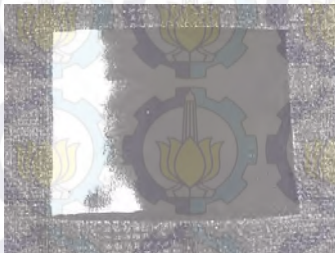
### 2.2.2.1 Elemen *Piezoelectric*

*Piezoelectric* berasal dari bahasa Yunani yaitu, ‘pressure’ electricity, dimana sifat tersebut ditemukan oleh Curie bersaudara sekitar 100 tahun yang lalu. Material yang mempunyai sifat *piezoelectric* adalah material yang akan menimbulkan ‘electrical charge’ jika material tersebut mengalami deformasi secara mekanis, baik tekan atau tarik akibat tekanan, tarikan atau tekukan. Sifat material *piezoelectric* inilah yang banyak digunakan pada alat atau komponen pembangkit listrik (skala mikro) yang kompak, ringan dan efisien.

Material *piezoelectric* merupakan material keramik yang sangat sensitif terhadap tegangan mekanik atau medan listrik. Jika tegangan mekanik diaplikasikan ke suatu material *piezoelectric* maka akan menghasilkan suatu medan listrik pada material tersebut. Fenomena ini disebut sebagai

efek *piezoelectric*. Efek *piezoelectric* mendeskripsikan hubungan antara tegangan mekanik dengan tegangan listrik pada benda padat. Efek *piezoelectric* tersebut bersifat reversible, yaitu dapat menghasilkan direct *piezoelectric* effect (menghasilkan energi listrik jika diaplikasikan tegangan mekanik) atau dapat menghasilkan reverse *piezoelectric* effect (menghasilkan tegangan dan/atau regangan mekanik jika diaplikasikan beda potensial listrik).

PZT adalah singkatan dari *lead zirconate titanate*, yaitu material keramik yang mempunyai sifat-sifat *piezoelectric*. Material ini sangat fleksibel, ringan, berupa lembaran yang tipis (ketebalannya bervariasi mulai 0.01 mm s/d 0.2 mm). Gambar 2.10 merupakan foto lembaran PZT dengan tebal 0.11 mm.



**Gambar 2.10** Lembaran PZT

### 2.2.2.2 Piezoelectric Constants

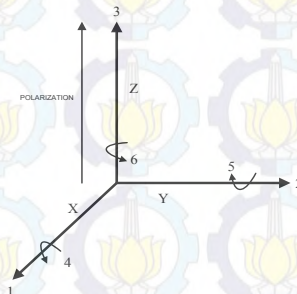
Keramik *piezoelectric* merupakan material yang *anisotropic*. Sehingga diperlukan konstanta fisika yang dapat menyatakan hubungan antara arah gaya mekanik dan gaya listrik yang diberikan atau dihasilkan. Hubungan ini dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk elemen, serta arah dari eksitasi mekanik atau elektrik dari keramik *piezoelectric*.

Identifikasi arah pada elemen *piezoceramic* mengacu pada 3 sumbu yang analog dengan sumbu X, Y, dan Z



dinotasikan sebagai 1,2 dan 3. Sedangkan untuk gaya atau tegangan geser, ketiga sumbu koordinat tersebut direpresentasikan oleh *subscript* 4,5, dan 6. Pada umumnya polarisasi keramik ditentukan sejajar dengan sumbu 3, yang mana arah polarisasi tersebut ditetapkan selama proses produksi untuk mengaktifkan material.

Pendefinisian konstanta *piezoelectric* biasanya ditandai dengan dua buah *subscript*. *Subscript* pertama menyatakan arah medan listrik yang berhubungan dengan voltase atau arus listrik yang diberikan atau dihasilkan, yaitu sumbu 3. Sedangkan *subscript* kedua menyatakan arah tegangan atau regangan mekanik, yang dalam hal ini merupakan arah yang searah dengan serat material atau arah yang tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh sumbu 3 dan sumbu yang searah dengan serat material.



**Gambar 2.11** Definisi Arah Pada Elemen Piezoelectric

Beberapa konstanta material *piezoceramic* ditandai dengan *subscript* yang menyatakan spesifikasi kondisi mekanik dan elektrik. *Subscript* yang digunakan adalah T, S, E, dan D yang menyatakan

T : tegangan konstan (sistem bebas secara mekanik)

S : regangan konstan (sistem dibatasi secara mekanik)

E : medan listrik konstan (*short circuit*)

D : perpindahan electric konstan (*open circuit*)

Sebagai contoh, KT3 menyatakan konstanta *dielectric* relatif diukur dalam arah polarisasi (3), pada tegangan konstan.

Beberapa definisi tentang konstanta beresta persamaan yang sering digunakan dipaparkan pada uraian berikut.

#### a. *Piezoelectric Charge Constant*

*Piezoelectric Charge Constant*,  $d$ , adalah polarisasi yang dibangkitkan per-unit tegangan mekanik yang diaplikasikan pada material *piezoelectric*, atau regangan mekanik yang terjadi pada material *piezoelectric* per-unit medan listrik yang diberikan. Sebagai contohnya,

$d_{31}$  : Polarisasi yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan normal yang diberikan pada arah 1, atau regangan yang terjadi dalam arah 1 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 3.

$d_{33}$  : Polarisasi yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan normal yang diberikan pada arah 3, atau regangan yang terjadi dalam arah 3 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 3.

$d_{15}$  : Polarisasi yang terinduksi pada arah 1 (tegak lurus terhadap arah polarisasi

elemen) per-unit tegangan geser yang diberikan pada arah 2 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen) atau regangan yang terjadi dalam arah 2 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 1.

Formula umum untuk *piezoelectric charge constant* adalah  $d = k \sqrt{s^E \epsilon^T}$

Dan jika diterapkan pada konstanta yang disebutkan diatas menjadi

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}$$

$$d_{33} = k_{33} \sqrt{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}$$

$$d_{15} = k_{15} \sqrt{s_{55}^E \epsilon_{11}^T}$$

dimana  $d$  : *piezoelectric charge constant* (C/N)

$k$  : *electromechanical coupling factor*

$s$  : *elastic compliance* (m<sup>2</sup>/N)

$\epsilon$  : *permittivity* (f/m)

## b. Permittivity

*Permittivity* atau *dielectric constant*,  $\epsilon$ , untuk material *piezoelectric* adalah perpindahan *dielectric* per-unit medan listrik.  $\epsilon^T$  adalah permittivity pada tegangan konstan,  $\epsilon^S$  adalah permittivity pada regangan konstan. Sebagai contohnya

$\epsilon_{11}^T$  : Permittivity untuk perpindahan dielectric dengan medan listrik pada arah 1 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen), pada kondisi tegangan konstan.



$\epsilon_{33}^S$  : Permittivity untuk perpindahan dielectric dengan medan listrik pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen), pada kondisi regangan konstan.

Konstanta relatif dielectric,  $K$ , adalah perbandingan dari konstanta  $\epsilon$  yaitu banyaknya muatan listrik yang tersimpan pada material *piezoelectric*, relatif terhadap konstanta dielectric absolut  $\epsilon^0$  yaitu banyaknya muatan listrik yang tersimpan pada elemen *piezoelectric* dalam kondisi *vacuum* ( $\epsilon^0 = 8.85 \times 10^{-12}$  farad/meter).

### c. Elastic Compliance

*Elastic compliance*,  $s$ , adalah regangan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* per-unit tegangan yang diberikan. Jika  $s^E$  adalah *compliance* pada kondisi medan listrik konstan,  $s^D$  adalah *compliance* pada kondisi perpindahan *electric* konstan. *Elastic compliance* merupakan kebalikan dari modulus elastisitas (*young's modulus*).

$s_{11}^E$  : *compliance elastis* untuk tegangan arah 1 (tegak lurus terhadap arah keramik yang terpolarisasi elemen) dan (dengan demikian menunjukkan) regangan arah 1, pada kondisi medan listrik konstan (*short circuit*).

$s_{33}^D$  : *compliance elastis* untuk tegangan arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) dan (dengan demikian menunjukkan) regangan arah 3, pada kondisi perpindahan elektrik konstan (*open circuit*).

Jika persamaan diatas diterapkan untuk *subscript* 11 dan 33 menjadi

$$s_{11}^D = \frac{1}{Y_{11}^D}$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{Y_{11}^E}$$

$$s_{33}^D = \frac{1}{Y_{33}^D}$$

$$s_{33}^E = \frac{1}{Y_{33}^E}$$

Formula umum untuk *elastic compliance* adalah  $s = 1 / v^2$

dimana  $s$  : *elastic compliance* ( $m^2/N$ )

$v$  : kecepatan suara pada material keramik ( $m/s$ )

$Y$  : *young's modulus* ( $N/m^2$ )

#### d. Young's Modulus

Seperti pada material solid yang lainnya, keramik *piezoelectric* mempunyai sifat kekakuan mekanik yang ditentukan oleh *Young's modulus*. *Young's modulus* adalah rasio tegangan (gaya per-unit luasan) terhadap regangan (perubahan panjang per-unit panjang).

Karena tegangan mekanik pada keramik menghasilkan respon listrik yang dilawan oleh regangan yang terjadi, maka *young's modulus* efektif untuk elektroda *short circuit* lebih rendah dibandingkan dengan *young's modulus* untuk elektroda *open circuit*. Berkenaan dengan hal tersebut, dalam menunjukan arah dan kondisi *electric* harus dispesifikasikan.

$Y_{33}^E$  : rasio tegangan terhadap regangan pada arah 3 dengan kondisi medan listrik konstan untuk *short circuit*.

$Y_{33}^D$  : rasio tegangan terhadap regangan pada arah 3 dengan kondisi medan listrik konstan untuk *open circuit*.



$Y_{55}^E$  : rasio tegangan geser terhadap regangan geser pada arah 2, masing-masing untuk *short circuit* dan *open circuit*.

$Y_{55}^D$  : rasio tegangan geser terhadap regangan geser pada arah 2, masing-masing untuk *short circuit* dan *open circuit*.

#### e. Electromechanical Coupling Factor

*Electromechanical coupling factor*,  $k$ , merupakan indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik.  $k$  disertai dua buah *subscript*, dimana dalam hal *direct effect* *subscript* pertama menunjukkan arah energi listrik yang dihasilkan dan *subscript* kedua menunjukkan arah dari energi mekanik yang diberikan.

Nilai  $k$  tergantung pada spesifikasi yang diberikan oleh supplier keramik, yang merupakan nilai maksimum secara teoritis, pada frekuensi rendah, elemen *piezoelectric* keramik tertentu dapat mengubah 30% - 75% dari energi yang diberikan padanya ke bentuk lain; tergantung pada komposisi material *piezoelectric* dan arah pembebanan yang diberikan. Nilai  $k$  tinggi, yang mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan *dielectric losses* atau *mechanical losses*. Ketelitian pengukuran efisiensi ditentukan berdasar pada rasio konversi energi, yaitu energi yang dapat dihasilkan oleh elemen *piezoelectric* terhadap total energi yang diberikan pada elemen. Berdasar paada pengukuran tersebut, elemen *piezoelectric* dengan desain sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi mencapai 90%.

Perlu diperhatikan bahwa dimensi dari elemen keramik mempengaruhi persamaan  $k$  yang digunakan. Misalnya untuk keramik *piezoelectric* berbentuk piringan tipis (*thin disc*) dikenal adanya *planar coupling factor*,  $k_p$ , yang menyatakan hubungan antara medan listrik yang paralel terhadap arah polarisasi elemen keramik (arah 3) dengan efek mekanik yang menghasilkan getaran radial relatif terhadap arah polarissai (arah 1 dan arah 2). Disamping itu ada *thickness coupling factor*,  $k_t$ , yang merupakan persamaan khusus  $k_{33}$ , yang menyatakan hubungan antara medan listrik arah 3 dengan getaran mekanik pada arah yang sama. Faktor  $k_t$  tersebut dikenal pula pada pelat *piezoelectric* yang memiliki dimensi permukaan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan dimensi tebal. Elemen *piezoelectric* dengan bentuk ini memiliki frekuensi resonansi pada arah transversal (permukaan). Faktor  $k_t$  lebih rendah daripada  $k_{33}$ , karena adanya kontraksi atau ekspansi pada tebal elemen sebagai akibat terjadinya getaran transversal dengan amplitudo besar pada frekuensi resonansi.

Pada batang keramik langsing (*thin rod*, panjang  $>10 \times$  diameter) digunakan  $k_{31}$  untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 1, atau digunakan  $k_{33}$  untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 3.

Formula *electromechanical coupling factor* untuk frekuensi eksitasi rendah atau kondisi statis, misalnya :

Pelat keramik  $\rightarrow k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \cdot \epsilon_{33}^T}$

Piringan keramik  $\rightarrow k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{(s_{11}^E + s_{12}^E) \cdot \epsilon_{33}^T}$

Batang keramik  $\rightarrow k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \cdot \epsilon_{33}^T}$

Formula *electromechanical coupling factor* untuk frekuensi eksitasi tinggi misalnya :

Pelat keramik  $\rightarrow k_{31}^2 = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{f_n}{f_m}\right)\tan\left(\frac{\pi f_n - f_m}{2 f_m}\right)}{1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{f_n}{f_m}\right)\tan\left(\frac{\pi f_n - f_m}{2 f_m}\right)}$

Piringan keramik  $\rightarrow k_p^2 = \left(2.51 \frac{f_n - f_m}{f_n}\right) - \left(\frac{f_n - f_m}{f_n}\right)^2$

Batang keramik  $\rightarrow k_{33}^2 = \left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{f_n}{f_m}\right)\tan\left(\frac{\pi f_n - f_m}{2 f_m}\right)$

Untuk material *piezoelectric* yang tidak disebutkan formulanya, digunakan bentuk umum  $\rightarrow k_{eff}^2 = \frac{f_n^2 - f_m^2}{f_n^2}$

dimana,  $k$  = *electromechanical coupling factor*

$d$  = *piezoelectric charge constant* (C/N)

$s$  = *elastic compliace* (m<sup>2</sup>/N)

$\epsilon$  = *permittivity* (f/m)

$f_m$  = frekuensi impedan minimum (Hz)

$f_n$  = frekuensi impedan maksimum (Hz)



Berikut spesifikasi bahan dari *piezoelectric*,

Piezoelectric Ceramics										
• PZT • $\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3$ • The lead zirconate titanate materials (soft ceramics).										
Material No.			C• 5	C• 6	C• 6H	C• 62	C• 63	C• 64	C• 601	
Use exampels.			Microphone Sound- sensors	Variously. sensor / Medical probe / Actuator •						
Coupling factors.	$\times 10^{-2}$	$k_p$	64	66	70	68	59	63	65	
		$k_{31}$	38	39	41	40	33	35	37	
		$k_{33}$	73	76	77	77	68	73	76	
		$k_t$	53	52	50	52	48	50	50	
		$k_{15}$	78	74	76	76	66	71	73	
Frequency constants.	$\text{m} \cdot \text{Hz}$	$N_p$	2060	1960	1960	1960	2130	1970	2060	
		$N_{31}$	1530	1420	1420	1440	1480	1380	1460	
		$N_{33}$	1400	1350	1380	1350	1500	1350	1380	
		$N_t$	2050	2010	2110	2040	2060	1970	2070	
		$N_{15}$	850	850	860	850	950	850	890	
Dielectric constants.		$\epsilon_{11} \cdot \epsilon_0$	2140	2270	2550	2730	1850	1960	2400	
		$\epsilon_{33} \cdot \epsilon_0$	1170	2130	2400	2600	2000	1850	2300	
Piezoelectric charge constants.	$\times 10^{-12}$ $\text{m} \cdot \text{v}$ ( $\text{C} \cdot \text{N}$ )	$d_{31}$	-140	-210	-240	-234	-185	-185	-210	
		$d_{33}$	333	472	490	500	320	435	500	
		$d_{15}$	764	758	800	860	530	670	730	
Piezoelectric voltage constants.	$\times 10^{-3}$ $\text{v} \cdot \text{m} \cdot \text{N}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{e}$ )	$g_{31}$	-14.5	-11.5	-11.2	-10.6	-9.5	-11.4	-10.0	
		$g_{33}$	32.1	25.3	23.2	24.4	23.0	24.4	23.0	
		$g_{15}$	40.3	37.7	35.6	35.6	32.5	38.5	34.0	
Yungs mdulus.	$\times 10^{10}$ $\text{N} \cdot \text{m}^2$	$Y_{11} = \frac{1}{s_{11}}$	7.2	6.2	6.3	6.3	6.7	5.9	6.7	
		$Y_{33} = \frac{1}{s_{33}}$	5.3	4.9	5.2	4.9	6.2	5.1	5.0	
		$Y_{66} = \frac{1}{s_{66}}$	1.9	1.9	2.0	1.9	2.5	2.0	2.2	
Poisson's ratio.		$\sigma$	0.29	0.32	0.31	0.30	0.37	0.34	0.33	
Mechanical Q		$Q_m$	90	80	70	75	90	80	110	
Dissipation factor.	• •	$\tan \delta$	1.65	1.60	2.0	1.65	1.2	1.5	0.9	
Curie point.	• •	$T_c$	305	295	290	245	295	345	285	
Density.	$\times 10^3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho$	7.65	7.65	7.8	7.60	7.6	7.7	7.8	
Temp. coefficient.	$\text{ppm} \cdot ^\circ \text{C}$	$f \tau T_c$	-40• +20•	-550	-330	-250	-380	-20	-180	-260
		$C p T_c$	+20• +80•	-680	-130	-5	170	80	180	-120
		$C p T_c$	-40• +20•	4230	3590	3400	3860	1850	3500	3300
		$C p T_c$	+20• +80•	7960	4850	4000	5610	2580	3600	4000
		$C p T_c$	-40• +20•	4230	3590	3400	3860	1850	3500	3300
Characteristics.		Middle $\epsilon$	Various use's soft material	• • • $\frac{1}{s_{11}}$ and $d_{33}$	High $d_{33}$	Stable temp. coefficient	High $T_c$	• • • $\frac{1}{s_{11}}$ and $d_{33}$		

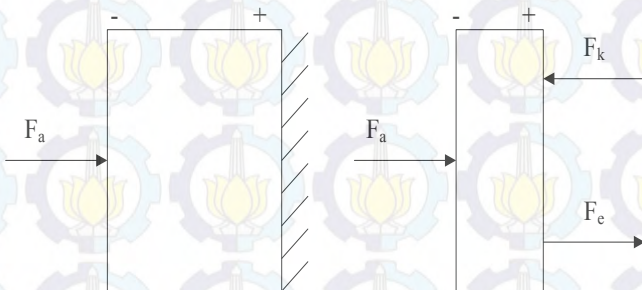
● FUJII CERAMICS CORPORATION

Gambar 2.12 Spesifikasi piezoelectric

### 2.2.2.3 Analisa Material *Piezoelectric*

#### 2.2.2.3.1 Single Layer *Piezoelectric*

##### a. Sifat mekanik



**Gambar 2.13** Gaya Mekanik dari *Piezoelectric*

Keseimbangan gaya:

$$\begin{aligned} F_a &= F_k - F_e \\ &= \frac{YA}{t} x - \frac{YA}{t} d_{33} v \\ &= \frac{YA}{t} (x - d_{33} v) \\ &= k \left( x - d_{33} \frac{Q}{c} \right) \dots\dots\dots(2.7) \end{aligned}$$

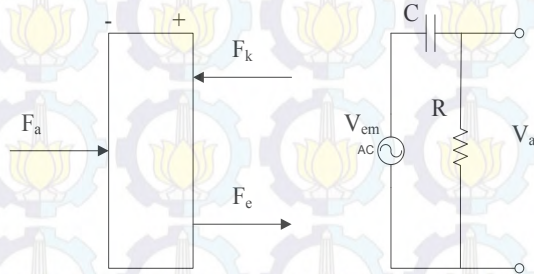
dimana :  $v = \frac{Q}{c}$  ;  $k = \frac{YA}{t}$  ;  $c = \frac{\epsilon A}{t}$   
sehingga,

$$F_a = k(x - x_e) = kx' \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana :  $x' = x - x_e$

Jika satu lapis material *piezoelectric* diberi gaya luar dan mengalami defleksi, maka gaya yang dapat dikonversi menjadi energy listrik sebesar koefisien pegas material *piezoelectric* dikalikan dengan perpindahan elektriknya.

b. Sifat elektrik



**Gambar 2.14** Gaya Electric dari Piezoelectric

$$V_a = V - V_c \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana :  $V$  = energy(voltase) yang dapat dihasilkan oleh material *piezoelectric*.

$$V = V_a + V_c \dots\dots\dots(2.10)$$

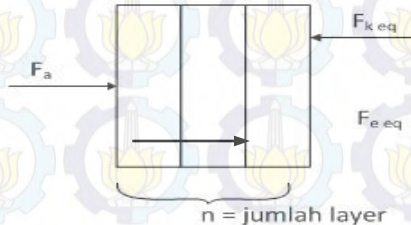
$$F_e = N \cdot V \dots\dots\dots(2.11)$$

$$V = \frac{N}{C} X \dots\dots\dots(2.12)$$

Pada dasarnya didalam material *piezoelectric* terdiri dari kapasitor dan resistor. Kapasitor merupakan elemen yang dapat menghasilkan voltase, sedangkan resistor merupakan rugi-rugi energy yang terjadi pada material *piezoelectric*. Sehingga arus yang dihasilkan dari material *piezoelectric* merupakan voltase yang dibangkitkan melalui impedance material *piezoelectric*.



### 2.2.2.3.2 Multi Layer Piezoelectric



**Gambar 2.15** Multi Layer Piezoelectric

Menyusun material *piezoelectric* menjadi multilayer akan menyebabkan sifat mekanik dan elektriknya berubah sesuai dengan bentuk susunannya seri atau paralel. Berikut akan dijelaskan pengaruh sifat mekanik terhadap bentuk rangkaiannya:

#### a. Sifat mekanik

Material *piezoelectric* dalam hal ini disusun secara seri, maka dari itu sifat mekaniknya adalah



**Gambar 2.16** Gaya Mekanik pada Multi Layer Piezoelectric

Untuk single layer

$$F_a = k \cdot x \dots \dots \dots (2.13)$$

Untuk multi layer

$$F_a = k_{eq} \cdot x_{tot} \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana  $k_{eq} = \frac{k}{n}$   
n = jumlah layer

$$F_a = \frac{k}{n} \cdot x_{tot} \dots \dots \dots (2.15)$$

Sehingga,

$$x_{tot} = n \frac{F_a}{k} = n \cdot x \dots \dots \dots (2.16)$$

Dengan gaya  $F_a$  yang sama besar antara single layer dan multi layer, maka gaya yang akan diberikan pada material *piezoelectric* yang disusun (stack), akan mempunyai defleksi total sebesar jumlah layer dikalikan defleksi yang terjadi.

Hal ini menggambarkan bahwa pada setiap lapis *piezoelectric* akan mempunyai defleksi yang sama yaitu  $x$ , sehingga sesuai dengan persamaan 2.16, maka setiap layer-nya akan menghasilkan perpindahan elektrik sebesar  $d_{33} \cdot v$ .

Persamaannya adalah

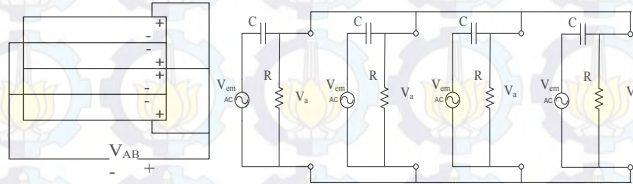
$$\begin{aligned} F_a &= k_{eq} \cdot x_{tot} \\ &= k_{eq} \cdot n \cdot x' \\ &= k_{eq} n (x - x_e) \\ &= k_{eq} n (x - d_{33} v) \dots \dots \dots (2.17) \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.17, disimpulkan bahwa dengan gaya yang sama besar, voltase yang dibangkitkan oleh material *piezoelectric* stock akan meningkat sebesar jumlah layer ( $n$ ).



## b. Sifat elektrik

Penyusun elektriknya menggunakan rangkaian paralel,



**Gambar 2.17** Multi Layer Piezoelectric jika disusun secara paralel

Untuk single layer

$$V_{em} = \frac{k \cdot d}{c} \cdot x \dots \dots \dots (2.18)$$

Untuk multi layer

$$\begin{aligned} V_{em} &= \frac{k_{eq} d_{33}}{C_{eq}} \cdot x_{tot} \\ &= \frac{k d_{33}}{n C_{eq}} \cdot x \dots \dots \dots (2.19) \end{aligned}$$

Energy (voltase) yang dihasilkan oleh masing-masing layer adalah sebesar  $V_{em}$ . Dan karena multi layer yang digunakan akan disusun secara paralel, maka penambahan layer tidak berpengaruh pada voltase. Sedangkan arus yang dihasilkan dari susunan tersebut merupakan penjumlahan dari arus yang dihasilkan semua layer.

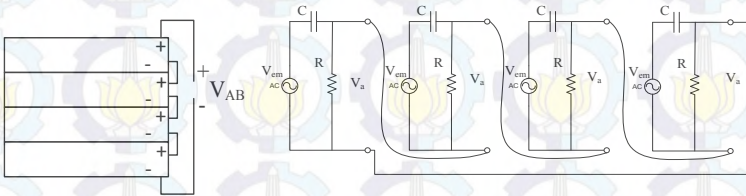
Voltase yang dihasilkan oleh multi layer *piezoelectric*:

$$V_{AB} = V_{em(layer1)} = V_{em(layer2)} = \dots \dots \dots (2.20)$$

Arus yang dihasilkan oleh multi layer *piezoelectric*:

$$i_{AB} = i_{layer1} + i_{layer2} + \dots \dots \dots (2.21)$$

Penyusun elektrik yang menggunakan rangkaian seri



**Gambar 2.18** Multi Layer Piezoelectric jika disusun secara seri

Voltase yang dihasilkan oleh multi layer *piezoelectric*:

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{layer1} + V_{layer2} + V_{layer3} + V_{layer4} \\ &= nV_{layer} \dots \dots \dots (2.22) \end{aligned}$$

Arus yang dihasilkan oleh multi layer *piezoelectric*:

$$i_{AB} = i_{layer1} = i_{layer2} = i_{layer3} = i_{layer4} \dots (2.23)$$

Dari persamaan pada rangkaian paralel dan rangkaian seri, disimpulkan bahwa dengan menyusun elektriknya secara paralel akan meningkatkan arus yang dapat dihasilkan. Sedangkan dengan menyusun elektriknya secara seri akan meningkatkan voltase yang dihasilkan.

### 2.2.2.3.3 Susunan *Piezoelectric*

- Single Layer *Piezoelectric*

Hubungan sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* single layer adalah:

$$F_a = kx - kd_{33} \frac{Q}{c} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana  $v = \frac{Q}{C}$

$$\frac{k \cdot d}{C} x = \dot{Q} \left( R + \frac{1}{\omega C} \right)$$

$$\dot{Q} = \frac{k d_{33} x}{C Z} \dots \dots \dots (2.25)$$

- Multi Layer *Piezoelectric*

Hubungan sifat mekanik dan elektrik dari *multi layer piezoelectric* adalah:

$$F_a = k_{eq} x_{tot} - k_{eq} \frac{d_{33} Q_{eq}}{C_{eq}} \dots \dots \dots (2.26)$$

$$k_{eq} x_{tot} \frac{d_{33}}{C_{eq}} = \dot{Q} \left( R_{eq} + \frac{1}{\omega C_{eq}} \right)$$

$$k_{eq} x_{tot} \frac{d_{33}}{C_{eq}} = \dot{Q} Z_{eq} \dots \dots \dots (2.27)$$

**a. Susunan Paralel**

$$k_{eq} = \frac{k}{n}; \quad x_{tot} = n \cdot x; \quad C_{eq} = n \cdot c; \quad R_{eq} = \frac{R}{n};$$

$$Z_{eq} = \frac{Z}{n}; \quad Q_{eq} = n \cdot Q$$

maka,

$$F_a = \frac{k}{n} n x - \frac{k}{n} \frac{d_{33} Q}{nC} = kx - k d_{33} \left( \frac{Q}{nC} \right) \rightarrow$$

$$voltage = \frac{v}{n} \dots \dots \dots (2.28)$$

$$\frac{k}{n} \frac{x d_{33}}{nC} = \dot{Q} \frac{Z}{n}$$

$$\dot{Q} = \frac{kd_{33}}{nZ} \frac{n}{C} \rightarrow \text{arus tetap} \dots \dots \dots (2.29)$$

Jadi jika *piezoelectric* stack disusun secara paralel maka keluaran voltase totalnya akan menjadi lebih kecil sedangkan arus totalnya tetap.

**b. Susunan Seri**

$$k_{eq} = \frac{k}{n}; \quad x_{tot} = n.x; \quad C_{eq} = \frac{C}{n}; \quad R_{eq} = n.R; \quad Z_{eq} = n.Z; \quad Q_{eq} = Q$$

maka,

$$F_a = \frac{k}{n} nx - \frac{k}{n} \frac{d_{33}Q}{C/n} = kx - kd_{33} \left( \frac{Q}{C} n \right) \rightarrow \text{voltase} = n.v \dots (2.30)$$

$$\frac{k}{n} n \frac{xd_{33}}{C/n} = \dot{Q} n Z$$

$$kx \frac{d_{33}}{C} n = \dot{Q} n Z$$

$$\dot{Q} = \frac{k.x.d_{33}}{CZ} \rightarrow \text{arus tetap} \dots \dots \dots (2.31)$$

Jadi jika *piezoelectric* stack disusun secara seri maka keluaran voltase totalnya akan menjadi lebih besar sedangkan arus totalnya tetap.



Berikut ini adalah tabel untuk analogi sifat mekanik terhadap sifat elektrik untuk menjelaskan hubungan rumusan yang ada.

**Tabel 2.1** *Analogi gaya-tegangan*

<b>Sistem Mekanik</b>	<b>Sistem Listrik</b>
Gaya $p$ (torsi $T$ )	Tegangan $e$
Massa $m$ (momen inersia $J$ )	Induktansi $L$
Koefisien gesekan $b$	Tahanan $R$
Tetapan pegas $k$	Kapasitansi bolak-balik, $1/C$
Perpindahan $x$ (perpindahan sudut $\theta$ )	Muatan $q$
Kecepatan $x$ (kecepatan sudut $\theta$ )	Arus $i$

**Tabel 2.2** *Analogi gaya-arus*

<b>Sistem Mekanik</b>	<b>Sistem Listrik</b>
Gaya $p$ (torsi $T$ )	Arus $i$
Massa $m$ (momen inersia $J$ )	Kapasitansi $C$
Koefisien gesekan $b$	Tahanan bolak-balik, $1/R$
Tetapan pegas $k$	Induktansi bolak-balik, $1/L$
Perpindahan $x$ (perpindahan sudut $\theta$ )	Fluks magnetik gandeng $\Psi$
Kecepatan $x$ (kecepatan sudut $\theta$ )	Tegangan $e$

Manfaat analogi sifat mekanik terhadap sifat elektrik ialah untuk memudahkan dalam perubahan perancangan dan memperkecil biaya perancangan. Untuk itu diperlukan analogi sifat mekanik terhadap sifat elektrik.

### 2.2.2.3.4 Analisa Dinamis *Piezoelectric*

Dengan menggunakan persamaan *constitutive*, massa elastis dapat dimodelkan sebagai *single degree of freedom* mendefinisikan persamaan dinamisnya. Penyelesaian keseimbangan gaya akan dilakukan dengan mensubstitusi gaya *piezoelectric* pada persamaan sebelumnya ke dalam respon mekaniknya.

Persamaan dinamis untuk sistem adalah

$$\Sigma F = m\ddot{u}$$

$$m\ddot{u}(t) + F_p(t) = F_k(t)$$

$$m\ddot{u}(t) + \left[\left(\frac{YA}{t}\right)u(t)\right] - [d_{33}YA \cdot \frac{v(t)}{t}] = F_k(t)$$

$$m\ddot{u}(t) + k_{p\text{ eq}}u(t) - d_{33}.k_{p\text{ eq}} \cdot \left(\frac{Q_3(t)_{eq}}{C_{eq}}\right) = F_k(t) \dots\dots(2.32)$$

dimana

$m$  : massa elastis

$L_p$  : panjang total massa elastis

$k_{p\text{ eq}} = \frac{YA}{L_p}$  : koefisien pegas multi-layer *piezoelectric*

$Q_3(t)_{eq}$  : charge multi-layer *piezoelectric*

$C_{eq}$  : capacitance multi-layer *piezoelectric*

Persamaan *constitutive* elemen *piezoelectric*, yang berkaitan dengan respon elektrik adalah

$$D_3(t) = d_{33}\sigma_{33}(t) + \varepsilon_{33}^T E_3(t)$$

$$\left[\frac{Q_3(t)}{A}\right] = \left[d_{33}\frac{F_m(t)}{A}\right] + \left[\varepsilon_{33}^T \cdot \frac{v(t)}{t}\right] \dots\dots\dots(2.33)$$

dimana  $D_3(t)$  : electric displacement

$\sigma_{33}(t)$  : stress

$\epsilon_{33}^T$  : permittivity

Untuk multi-layer *piezoelectric*,

$$\left[\frac{Q_3(t)}{A}\right] = [n.d_{33} \cdot \frac{F_m(t)}{A}] + [n.\epsilon_{33}^T \cdot \frac{v(t)}{t}]$$

$$Q_3(t) = [d_{33}.F_m(t)] + [n.\epsilon_{33}^T.A. \frac{v(t)}{t}] \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\text{Karena } C = \frac{n.\epsilon_{33}^T.A}{t}$$

Maka persamaan 2.34 menjadi

$$Q_3(t) = d_{33}.k_p.u(t) + C.v(t)$$

$$v(t) = \left[\frac{Q_3(t)}{C}\right] - \left[d_{33}.k_p. \frac{u(t)}{C}\right] \dots\dots\dots(2.35)$$

Pada persamaan 2.35 dapat disubstitusikan *load resistance* R, sebagai berikut

$$v(t) = -R \dot{Q}_3(t)$$

dimana  $i(t) = \dot{Q}_3(t)$  : electric charge  
R : resistance

Sehingga menjadi

$$R \dot{Q}_3(t) - \left[d_{33}.k_p. \frac{u(t)}{C}\right] + \left[\frac{Q_3(t)}{C}\right] = 0 \dots\dots\dots(2.36)$$

Jika dimasukan pada persamaan awal, maka

$$m\ddot{u}(t) + k_{p\text{ eq}} u(t) - d_{33}.k_p. \frac{Q_3(t)}{C} = F_k(t)$$

$$R \dot{Q}_3(t) - \left[d_{33}.k_p. \frac{u(t)}{C}\right] + \left[\frac{Q_3(t)}{C}\right] = 0 \dots\dots\dots(2.37)$$

Jika dituliskan dalam notasi matrik, kedua persamaan diatas dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{Q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{Q}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{p \text{ eq}} & -\frac{d33.kp}{c} \\ -\frac{d33.kp}{c} & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(t) \\ Q(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_k(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dengan asumsi bahwa *load impedance* mempunyai gerakan seperti eksitasinya, maka *power output* dapat dihitung, dengan mendefinisikan

$$Z = \frac{1}{\omega C} = \frac{t}{\omega n \epsilon_{33} A}$$

dimana

$\omega$  = frekuensi dari fungsi pembebanan eksitasi

$R = Z$ , maka persamaan matrik menjadi

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{Q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\omega C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}(t) \\ \dot{Q}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{p \text{ eq}} & -\frac{d33.kp}{c} \\ -\frac{d33.kp}{c} & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(t) \\ Q(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_k(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

dengan C yang dapat ditentukan, maka dari persamaan diatas akan di dapatkan  $u(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $\ddot{u}(t)$  dan  $Q(t)$ ,  $\dot{Q}(t)$ ,  $\ddot{Q}(t)$  dan power dapat ditentukan menurut,

$$P(t) = \frac{v(t)^2}{Z} = \{t\}^2 Z \dots \dots \dots (2.38)$$

## 2.2.3 MATLAB SIMULINK

### 2.2.3.1 MATLAB

MATLAB adalah komputasi tingkat tinggi bahasa teknis dan lingkungan interaktif untuk pengembangan algoritma, visualisasi data, analisis data, dan komputasi numerik. MATLAB, dapat menyelesaikan masalah



komputasi teknis lebih cepat dibandingkan dengan bahasa pemrograman tradisional, seperti C, C ++, dan Fortran.

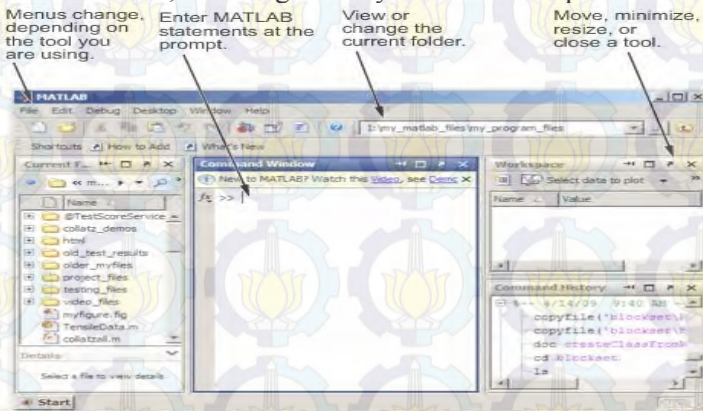
Penggunaan MATLAB bisa dalam berbagai aplikasi, termasuk sinyal dan pengolahan citra, komunikasi, desain kontrol, uji dan pengukuran, pemodelan dan analisis keuangan, dan biologi komputasi. Add-on toolboxes (tujuan khusus fungsi MATLAB, tersedia secara terpisah) memperpanjang lingkungan MATLAB untuk memecahkan masalah kelas tertentu pada aplikasinya.

MATLAB menyediakan sejumlah fitur untuk mendokumentasikan suatu pekerjaan. Fitur-fitur itu termasuk:

- Bahasa tingkat tinggi untuk komputasi teknis.
- Pengembangan lingkungan untuk mengelola kode, file, dan data.
- Interaktif alat untuk eksplorasi iteratif, desain, dan pemecahan masalah.
- Matematika fungsi untuk aljabar linear, statistik, analisis Fourier, penyaringan, optimasi, dan integrasi numeric.
- 2-D dan 3-D grafis fungsi untuk data visualisasi.
- Alat untuk membangun antarmuka pengguna grafis kustom.
- Fungsi untuk mengintegrasikan algoritma berbasis MATLAB dengan aplikasi eksternal dan bahasa, seperti C, C ++, Fortran, Java <sup>TM</sup>, COM, dan Microsoft <sup>®</sup> Excel.

Untuk memulai Sesi MATLAB dengan mengklik dua kali shortcut MATLAB pada desktop Windows Anda. Ketika memulai MATLAB, secara default, Matlab secara otomatis memuat semua file program yang disediakan oleh MathWorks untuk MATLAB dan lainnya MathWorks

produk. Ada beberapa cara alternatif untuk memulai MATLAB, dan dengan menyesuaikan startup MATLAB.



*Gambar 2.19 Contoh MATLAB*

### 2.2.3.2 SIMULINK

Software Simulink, mensimulasikan, dan analisis sistem dinamis. Simulink dapat dengan mudah membangun model dari awal, atau memodifikasi model yang ada untuk memenuhi kebutuhan. Simulink mendukung sistem linier dan nonlinier, dimodelkan dalam waktu kontinu, waktu sampel, atau hibrida dari keduanya. Sistem juga dapat multirate - memiliki bagian-bagian berbeda yang disampel atau diperbarui pada tingkat yang berbeda.

Ribuan ilmuwan dan insinyur di seluruh dunia menggunakan Simulink untuk model dan memecahkan masalah nyata di berbagai industri, termasuk:

- Aerospace dan Pertahanan
- Otomotif
- Komunikasi

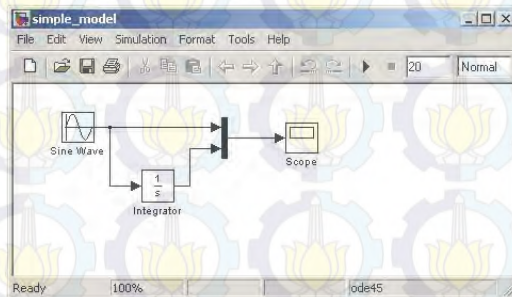
- Elektronika dan Pengolahan Sinyal
- Instrumentasi Medis

Menggunakan software Simulink untuk model sistem dinamis dan mensimulasikan perilaku model. Teknik-teknik dasar yang digunakan untuk membuat model sederhana dengan Simulink adalah teknik yang sama yang digunakan untuk model yang lebih kompleks.

Untuk membuat model sederhana, diperlukan empat blok:

- Sine Wave - Menghasilkan sinyal input untuk model.
- Integrator - Proses sinyal masukan.
- Mux - Multiplexes sinyal input dan sinyal diproses menjadi sinyal tunggal.
- Scope - Visualisasi sinyal dalam model.

Setelah blok yang terhubung, Simulink model sistem yang mengintegrasikan sinyal gelombang sinus dan menampilkan hasilnya bersama dengan sinyal asli.



*Gambar 2.20 Model sederhana Simulink*





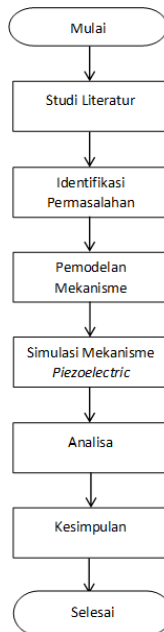
---

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 TAHAPAN PENELITIAN

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, disusunlah sejumlah tahapan yang merupakan langkah – langkah dalam mewujudkan tujuan. Tahapan tersebut dinyatakan dalam diagram alir sebagai berikut:



*Gambar 3.1 Diagram alir tugas akhir secara global*

Tahapan dalam pelaksanaan tugas akhir ini secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1 dimulai dengan studi literatur mengenai *piezoelectric*, selanjutnya mengidentifikasi permasalahan pada mekanisme kemudian membuat pemodelan mekanisme *piezoelectric*. Setelah selesai membuat pemodelan, penulis mensimulasikan pemodelan tersebut dengan menggunakan software MATLAB untuk mendapatkan respon *displacement*, kuat arus, dan daya yang dihasilkan oleh mekanisme *piezoelectric*. Selanjutnya menganalisa hasil simulasi dan diambil kesimpulan.

## 3.2 PENJELASAN

### 3.2.1 STUDI LITERATUR

Tahap studi literatur dilakukan untuk memperkaya wawasan, pengetahuan dan landasan mengenai materi yang akan dibahas dalam tugas akhir ini. Sumber literatur diambil dari buku – buku teks, makalah, jurnal dan informasi – informasi yang didapat dari internet yang sesuai dengan tema tugas akhir ini, yaitu *piezoelectric*. Dari tema ini bisa diketahui bidang ilmu yang mendukung, misalnya *mechanical vibration*, elektronika serta *transfer function*.

### 3.2.2 IDENTIFIKASI PERMASALAHAN

Pada tugas akhir ini digunakan *multilayer piezoelectric* untuk mengubah energi getaran menjadi energi listrik. Terdapat dua parameter utama yang menjadi identifikasi permasalahan yaitu *variable input* serta *variable output*. Parameter yang dijadikan *variable input*nya berupa gaya getaran mesin yang diteruskan ke struktur. Sedangkan



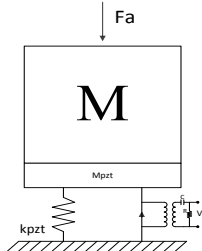
*variable* outputnya berupa respon *displacement*, kuat arus dan daya yang dihasilkan oleh *multilayer piezoelectric*.

### 3.2.3 PERMODELAN

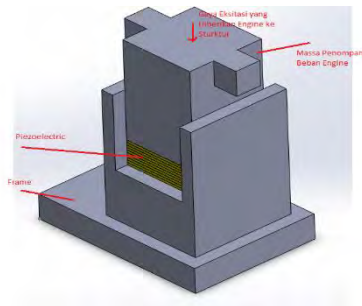
Pada pemodelan ada 3 macam mekanisme yang akan dibuat, dimana model 2 dan 3 memiliki variasi  $\theta = 45^\circ$  dan  $\theta = 60^\circ$ . Dimana semua mekanisme menggunakan ketebalan elemen *piezoelectric*, volume total besi pendorong dan volume total *multilayer piezoelectric* yang sama besar. Kemudian ditentukan model mekanis dan elektrik pada tiap – tiap model.

#### a. Model 1

- Gaya eksitasi yang diberikan kepada mekanisme tegak lurus terhadap luas bidang penampang dari *multilayer piezoelectric*.
- Saat massa besi pendorong bergerak keatas maka energi listrik tidak dihasilkan.



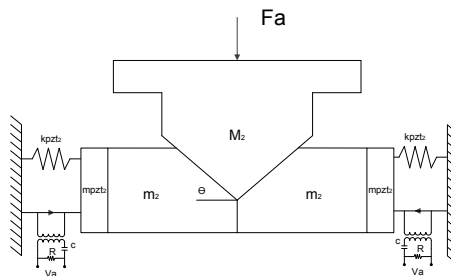
**Gambar 3.2 Model 1**



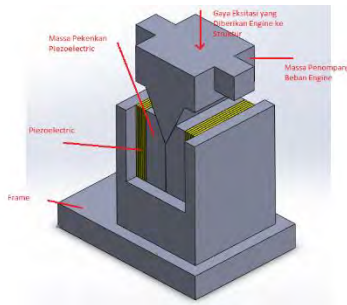
**Gambar 3.3 Model 1 dalam 3D**

b. Model 2

- Gaya eksitasi yang diberikan kepada mekanisme searah terhadap luas bidang penampang dari *multilayer piezoelectric*.
- Saat massa besi pendorong bergerak keatas maka energi listrik tidak dihasilkan.
- Model disimulasikan dengan variasi  $\theta = 45^\circ$  dan  $\theta = 60^\circ$ .



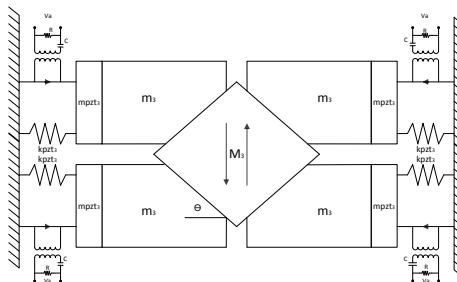
**Gambar 3.4 Model 2**



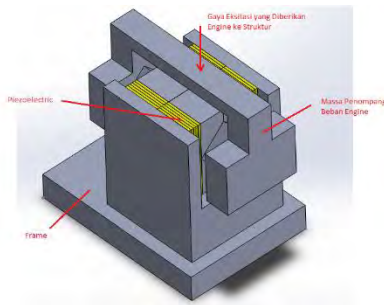
**Gambar 3.5 Model 2 dalam 3D**

c. Model 3

- Gaya eksitasi yang diberikan kepada mekanisme searah terhadap luas bidang penampang dari *multilayer piezoelectric*.
- Saat massa besi pendorong bergerak keatas maka energi listrik tetap dihasilkan.
- Model disimulasikan dengan variasi  $\theta = 45^\circ$  dan  $\theta = 60^\circ$ .



**Gambar 3.6 Model 3**

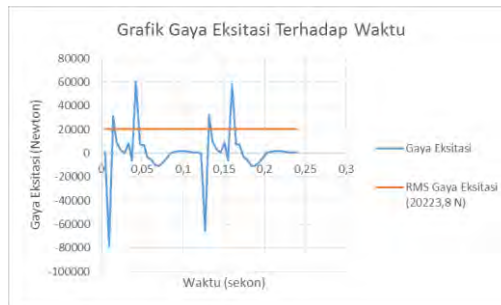


**Gambar 3.7 Model 3 dalam 3D**

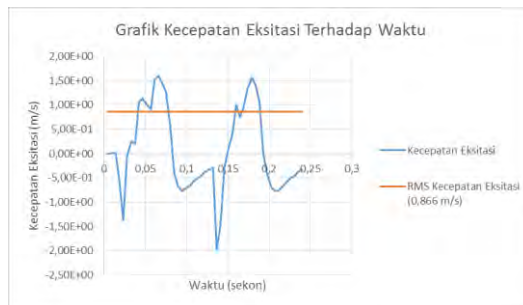
### 3.2.4 SIMULASI

Dari simulasi yang menggunakan *software* MATLAB akan didapatkan respon berupa *displacement*, kuat arus, dan daya dari *multilayer piezoelectric* yang merenggang dan merapat, akibat gerakan sebuah mekanisme yang digetarkan oleh getaran mesin mobil(gaya eksitasi).

Adapun besar getaran mesin mobil(gaya eksitasi) diambil dari grafik penjumlahan gaya eksitasi respon *bouncing* dan *picking* pada variasi panjang *connecting rod* pertama ( $L_1=115,6\text{mm}$ ) untuk 1000 rpm yang diambil dari tugas akhir Karina Yulia yang berjudul, “*Pemodelan dan Analisa Getaran Motor Bensin 4 Langkah 2 Silinder 650cc Segaris Dengan Sudut Engkol  $0^\circ$  Untuk Rubber Mount*”.



**Grafik 3.8** Grafik penjumlahan gaya eksitasi respon bouncing dan picing pada variasi panjang connecting rod pertama ( $L1=115,6\text{mm}$ ) untuk 1000 rpm



**Grafik 3.9** Grafik penjumlahan kecepatan eksitasi respon bouncing dan picing pada variasi panjang connecting rod pertama ( $L1=115,6\text{mm}$ ) untuk 1000 rpm

### 3.2.5 ANALISA

Respon simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik untuk dianalisa. Kemudian akan diketahui model yang menghasilkan respon *displacement*, kuat arus, dan daya terbesar.



### **3.2.6 KESIMPULAN**

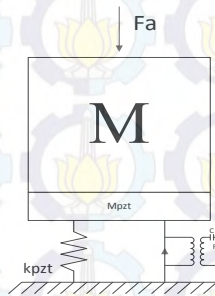
Tahap akhir dari tugas akhir ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan analisa pada respon *displacement*, kuat arus, dan daya yang dihasilkan oleh mekanisme *multilayer piezoelectric*.

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

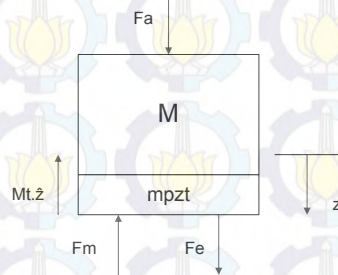
### 4.1 ANALISA

#### 4.1.1 MODEL 1

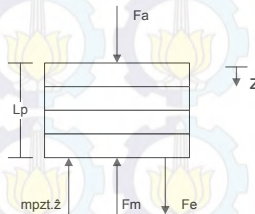
##### 4.1.1.1 MEKANISME MODEL 1



**Gambar 4.1.a Model 1**



**Gambar 4.1.b Keseimbangan Gaya pada Model 1**



**Gambar 4.1.c Keseimbangan Gaya pada M-L Piezoelectric Jika Diberikan Gaya Eksitasi**

Keseimbangan gayanya adalah

$$M_T \ddot{z} + F_m = F_a + F_e$$

$$M_T \ddot{z} + k_T z = F_a + F_e \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana :

$$M_T = M + m_{pzt} : \text{Massa Total} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

$$k_T = \frac{YA}{L_p} : \text{Koefisien pegas } \textit{multilayer piezoelectric} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$F_e = NV : \text{Gaya elektrik } \textit{multilayer piezoelectric} \dots\dots\dots(4.4)$$

Analisa elektrik dari *multilayer piezoelectric* adalah

$$V_{(t)} - V_{C(t)} = V_{R(t)}$$

$$\frac{Nz_{(t)}}{C} - \frac{Q_{(t)}}{C} = \dot{Q}_{(t)} R \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

Dimana:

$$N = \frac{d_{33}YA}{L_p} : \text{Faktor penghubung mekanik-elektik} \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

$V_{(t)}$  : Voltase yang dihasilkan massa M-L PZT

$V_{C(t)}$  : Voltase *capacitance* pada elemen PZT

$V_{R(t)}$  : Voltase yang dapat digunakan/ melewati *load resistance* R

Kemudian persamaan 4.1 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$(M_T s^2 + k_T) z_{(s)} = F_{a(s)} + NV_{(s)}$$

$$Z(s) = \frac{F_a(s)}{(M_T s^2 + k_T)} + \frac{N}{(M_T s^2 + k_T)} V(s) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$Z(s) = G_1(s)F_a(s) + G_2(s)V(s)$$

$$G_1(s) = \frac{1}{M_T s^2 + k_T} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

$$G_2(s) = \frac{N}{M_T s^2 + k_T} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Dari persamaan 4.5 diketahui bahwa

$$V(t) = \frac{N}{C} Z(t) \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

Dari persamaan 4.10 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$V(s) = \frac{N}{C} Z(s)$$

$$V(s) = G_3(s)Z(s)$$

$$G_3(s) = \frac{N}{C} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4.10 ke persamaan 4.5 diperoleh

$$V(t) - \frac{Q(t)}{C} = \dot{Q}(t)R \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

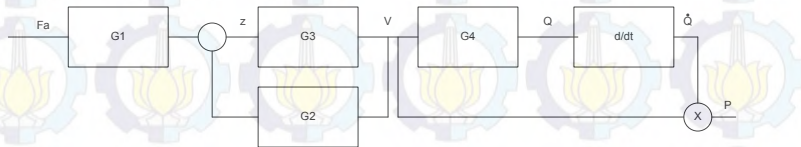
Lalu persamaan 4.11 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace

$$V(s) = Q(s) \left( \frac{1}{C} + Rs \right)$$

$$Q(s) = G_4(s)V(s)$$

$$G_4(s) = \frac{1}{1/C + Rs} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

Dibuat Blok diagram sebagai berikut:



**Gambar 4.2** Blok diagram dari model 1

Dengan menggunakan simulink blok diagram dibuat dan dimasukkan variabel- variabel berikut:

$$d_{33} = 47.10^{-12} C/N$$

$$Y = 4,9.10^{10} N/m^2$$

$$A = 0,0009 m^2$$

$$t = 0,000111 m$$

$$\varepsilon_{33}^T = 1,885.10^{-8}$$

$$\rho_{pzt} = 7,65.10^3 kg/m^3$$

$$n = 20$$

$$\rho_{besi} = 7874 kg/m^3$$

$$V_{besi} = 38.10^{-6} m^3$$

$$N = \frac{d_{33}YA}{tn} = \frac{47.10^{-12} \times 4,9.10^{10} \times 0,0009}{0,000111 \times 20} = 9,3762$$



$$k_T = \frac{YA}{tn} = \frac{4,9 \cdot 10^{10} \times 0,0009}{0,000111 \times 20} = 1,9865 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$$

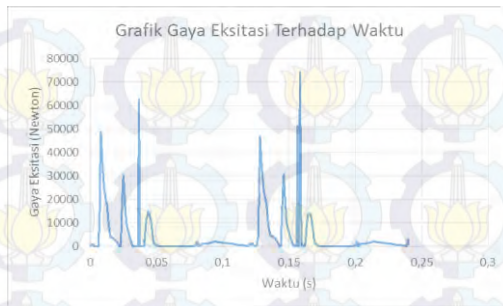
$$m_{pzt} = \rho_{pzt} Ant = 7,65 \cdot 10^3 \times 0,0009 \times 20 \times 0,000111 = 0,0153 \text{ kg}$$

$$M_{besi} = \rho_{besi} V_{besi} = 7874 \times 38 \cdot 10^{-6} = 0,2992 \text{ kg}$$

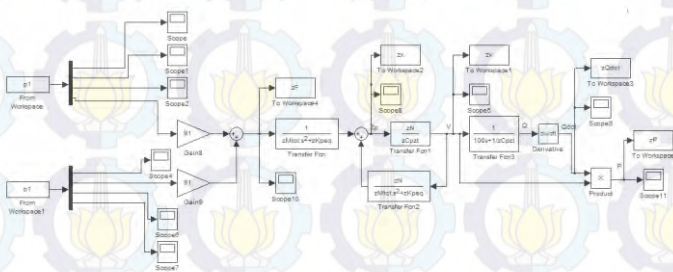
$$M_T = M_{besi} + m_{pzt} = 0,2992 + 0,0153 = 0,3145 \text{ kg}$$

$$C = \frac{n \varepsilon_{33}^T A}{t} = \frac{20 \times 1,885 \cdot 10^{-8} \times 0,0009}{0,000111} = 3,0568 \cdot 10^{-6}$$

Catatan : Input gaya eksitasi diambil dari tugas akhir Karina Yulia yang berjudul, “*Pemodelan dan Analisa Getaran Motor Bensin 4 Langkah 2 Silinder 650cc Segaris Dengan Sudut Engkol 0° Untuk Rubber Mount*”. Input saat kondisi rpm = 1000 dan L1=115,6mm. Dimana gaya eksitasi yang diambil hanya yang positif dengan mengasumsikan bahwasanya gaya yang bernilai positif adalah gaya yang menekan *multilayer piezoelectric*. Adapun gaya yang bernilai negatif adalah gaya eksitasi yang menarik *multilayer piezoelectric* , karena massa balok pendorong dengan massa *multilayer piezoelectric* terpisah.



**Gambar 4.3** Grafik gaya eksitasi terhadap waktu

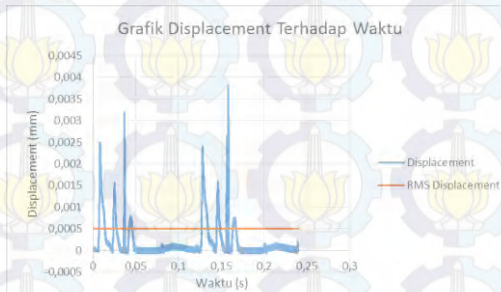


**Gambar 4.4** Blok diagram Simulink MATLAB model 1

Dari simulasi ini diperoleh respon *multilayer piezoelectric* berupa daya yang dihasilkan, kuat arus dan *displacement* dari *piezoelectric*. Kemudian dengan menggunakan *software microsoft excel* kita memperoleh grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu, kuat arus terhadap waktu dan *displacement piezoelectric* terhadap waktu.

#### 4.1.1.2 HASIL SIMULASI

##### 4.1.1.2.1 ANALISA GRAFIK DISPLACEMENT TERHADAP WAKTU (rpm = 1000 dan L1=115,6mm)



**Gambar 4.5** Grafik displacement multilayer piezoelectric terhadap waktu

Dari gambar 4.5 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 0,003808 mm dan RMSnya 0,0005 mm. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.5 dibandingkan dengan gambar 4.3 semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric* dari getaran mesin maka semakin besar pula *displacement* yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.7 dimana displacement berbanding lurus dengan gaya eksitasi ( $F_a$ ).

#### 4.1.1.2.2 ANALISA GRAFIK KUAT ARUS YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000 dan L1=115,6mm)



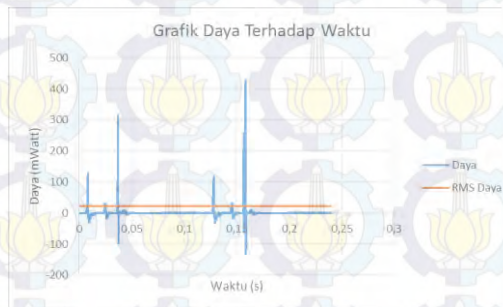
**Gambar 4.6** Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu

Dari gambar 4.6 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 36,782 mA dan RMSnya 4,15 mA. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.6 dibandingkan dengan gambar 4.3 terlihat bahwa semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric* dari getaran mesin maka semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.5 dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. Sehingga jika *displacement* membesar maka kuat arus membesar. Sedangkan *displacement* semakin besar jika gaya eksitasi semakin besar.



#### 4.1.1.2.3 ANALISA GRAFIK DAYA YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000 dan L1=115,6mm)



**Gambar 4.7** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu

Dari gambar 4.7 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 428,543 mWatt dan RMSnya 21,91 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.7 dibandingkan dengan gambar 4.3 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula daya yang dihasilkan ini sesuai dengan rumus daya ( $P = I^2/R$ ), dimana kuadrat kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga kuat arus membesar maka daya juga ikut membesar. Sedangkan kuat arus berbanding lurus dengan *displacement*, dan *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi.

Kemudian efisiensi dari model 1 adalah



$$\eta = \frac{RMS P_{out}}{RMS P_{in}} \times 100\% = \frac{0,02191 \text{ Watt}}{17513,8108 \text{ Watt}} = 1,251 \cdot 10^{-4} \%$$

Catatan:

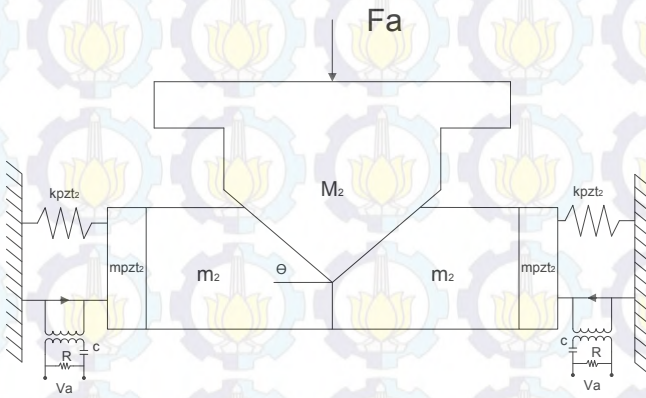
$$RMS P_{in} = RMS F_{eks} \cdot RMS v_{eks}$$

$$RMS F_{eks} = RMS \text{ Gaya Eksitasi}$$

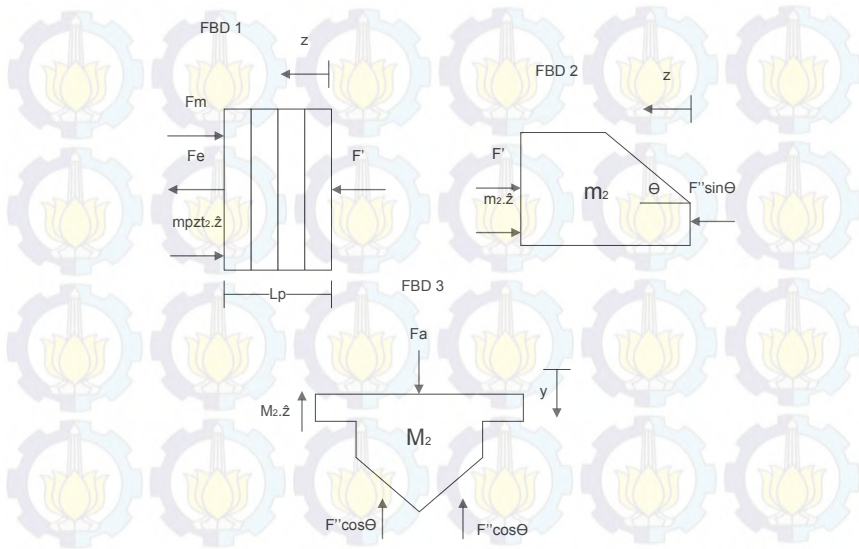
$$RMS v_{eks} = RMS \text{ Kecepatan Eksitasi}$$

## 4.1.2 MODEL 2

### 4.1.2.1 MEKANISME MODEL 2 ( $\theta = 45^\circ$ atau $\theta = 60^\circ$ )



Gambar 4.8 Model 2



**Gambar 4.9 Keseimbangan Gaya pada Model 2**

Keseimbangan gayanya adalah

$$\tan \theta = z/y = \ddot{z}/\ddot{y} = F'' \sin \theta / F'' \cos \theta \quad \dots\dots\dots(4.14)$$

Dari FBD 1:

$$\begin{aligned} m_{pzt2}\ddot{z} &= F' + F_e - F_m \\ m_{pzt2}\ddot{z} &= F' + F_e - k_{pzt2}z \quad \dots\dots\dots(4.15) \end{aligned}$$

Dari FBD 2:

$$m_2\ddot{z} = F'' \sin \theta - F' \quad \dots\dots\dots(4.16)$$

Dari FBD 3:

$$M_2 \ddot{y} = F_a - 2F'' \cos \theta \quad \dots\dots\dots(4.17)$$

Substitusikan persamaan 4.16 ke persamaan 4.15

$$m_{pzt2} \ddot{z} = F'' \sin \theta - m_2 \ddot{z} + F_e - k_{pzt2} z \quad \dots\dots\dots(4.18)$$

Masukkan persamaan 4.14 ke dalam persamaan 4.17

$$M_2 \frac{\ddot{z}}{\tan \theta} = F_a - 2F'' \frac{\sin \theta}{\tan \theta} \quad \dots\dots\dots(4.19)$$

Masukkan persamaan 4.18 ke persamaan 4.19

$$\begin{aligned} M_2 \frac{\ddot{z}}{\tan \theta} &= F_a - \frac{2(m_{pzt2} \ddot{z} + m_2 \ddot{z} - F_e + k_{pzt2} z)}{\tan \theta} \\ \frac{M_2}{\tan \theta} \ddot{z} + \frac{2m_{pzt2}}{\tan \theta} \ddot{z} + \frac{2m_2}{\tan \theta} \ddot{z} &= \frac{F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt2} z}{\tan \theta} \\ (M_2 + 2m_{pzt2} + 2m_2) \ddot{z} &= F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt2} z \\ M_T \ddot{z} &= F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt2} z \quad \dots\dots\dots(4.20) \end{aligned}$$

dimana :

$$M_T = M_2 + 2m_{pzt2} + 2m_2 \quad \dots\dots\dots(4.21)$$

Analisa elektrik dari *multilayer piezoelectric* adalah

$$\begin{aligned} V_{(t)} - V_{C(t)} &= V_{R(t)} \\ \frac{Nz(t)}{C} - \frac{Q(t)}{C} &= \dot{Q}(t) R \quad \dots\dots\dots(4.22) \end{aligned}$$

Dimana:

$$N = \frac{d_{33} Y A}{L_p} \quad \dots\dots\dots(4.23)$$

Kemudian persamaan 4.20 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$(M_T s^2 + 2k_{pzt2}) Z(s) = F_{a(s)} \tan \theta + 2NV(s)$$

$$Z(s) = \frac{F_{a(s)} \tan \theta}{(M_T s^2 + 2k_{pzt2})} + \frac{2N}{(M_T s^2 + 2k_{pzt2})} V(s) \dots \dots \dots (4.24)$$

$$Z(s) = G_{1(s)} F_{a(s)} + G_{2(s)} V(s)$$

$$G_{1(s)} = \frac{\tan \theta}{M_T s^2 + 2k_{pzt2}} \dots \dots \dots (4.25)$$

$$G_{2(s)} = \frac{2N}{M_T s^2 + 2k_{pzt2}} \dots \dots \dots (4.26)$$

Dari persamaan 4.22 diketahui bahwa

$$V(t) = \frac{N}{c} Z(t) \dots \dots \dots (4.27)$$

Dari persamaan 4.27 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$V(s) = \frac{N}{c} Z(s)$$

$$V(s) = G_{3(s)} Z(s)$$

$$G_{3(s)} = \frac{N}{c} \dots \dots \dots (4.28)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4.27 ke persamaan 4.22 diperoleh

$$V(t) - \frac{Q(t)}{c} = \dot{Q}(t) R \dots \dots \dots (4.29)$$

Lalu persamaan 4.29 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace



$$V(s) = Q(s) \left( \frac{1}{C} + Rs \right)$$

$$Q(s) = G_4(s) V(s)$$

$$G_4(s) = \frac{1}{1/C + Rs} \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

Dibuat Blok diagram sebagai berikut:



**Gambar 4.10** Blok diagram dari model 2

Dengan menggunakan simulink blok diagram dibuat dan dimasukkan variabel- variabel berikut:

$$\theta = 45^\circ$$

$$d_{33} = 47.10^{-12} C/N$$

$$Y = 4,9.10^{10} N/m^2$$

$$A = 0,0009 m^2$$

$$t = 0,000111 m$$

$$\epsilon_{33}^T = 1,885.10^{-8}$$

$$\rho_{pzt} = 7,65.10^3 kg/m^3$$

$$n = 10$$



$$\rho_{besi} = 7874 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_{besi(m_2)} = 8,25 \cdot 10^{-6} m^3$$

$$V_{besi(M_2)} = 21,5 \cdot 10^{-6} m^3$$

$$N = \frac{d_{33}YA}{tn} = \frac{47 \cdot 10^{-12} \times 4,9 \cdot 10^{10} \times 0,0009}{0,000111 \times 20} = 9,3762$$

$$k_{pzt2} = \frac{YA}{tn} = \frac{4,9 \cdot 10^{10} \times 0,0009}{0,000111 \times 10} = 3,973 \cdot 10^{10} N/m$$

$$m_{pzt2} = \rho_{pzt} Ant = 7,65 \cdot 10^3 \times 0,0009 \times 10 \times 0,000111 \\ = 0,0076 kg$$

$$m_2 = \rho_{besi} V_{besi(m_2)} = 7874 \times 8,25 \cdot 10^{-6} = 0,0650 kg$$

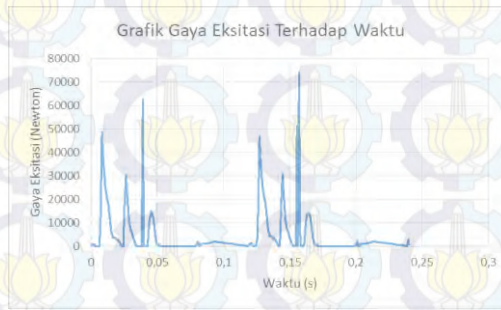
$$M_2 = \rho_{besi} V_{besi(M_2)} = 7874 \times 21,5 \cdot 10^{-6} = 0,1693 kg$$

$$M_T = M_2 + 2m_{pzt2} + 2m_2 = 0,1693 + 2(0,0076) + 2(0,0650) \\ = 0,3145 kg$$

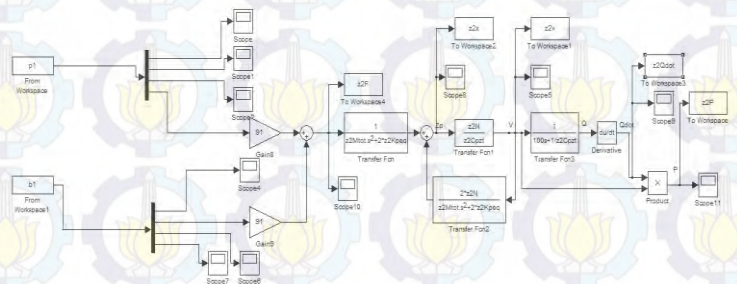
$$C = \frac{n\varepsilon_{33}^T A}{t} = \frac{10 \times 1,885 \cdot 10^{-8} \times 0,0009}{0,000111} = 1,5284 \cdot 10^{-6}$$

Catatan : Input gaya eksitasi diambil dari tugas akhir Karina Yulia yang berjudul, “*Pemodelan dan Analisa Getaran Motor Bensin 4 Langkah 2 Silinder 650cc Segaris Dengan Sudut Engkol 0° Untuk Rubber Mount*”. Simulasi pertama saat kondisi rpm = 1000 dan L1=115,6mm dengan sudut besi pendorong  $\theta = 45^\circ$ . Sedangkan simulasi kedua dengan  $\theta = 60^\circ$ . Dimana gaya ekstitasi yang diambil hanya yang positif dengan

mengasumsikan bahwasanya gaya yang bernilai positif adalah gaya yang menekan *multilayer piezoelectric*. Adapun gaya yang bernilai negatif adalah gaya eksitasi yang menarik *multilayer piezoelectric*, karena massa balok pendorong dengan massa *multilayer piezoelectric* terpisah.



Gambar 4.11 Grafik gaya eksitasi terhadap waktu



Gambar 4.12 Blok diagram Simulink MATLAB model 2

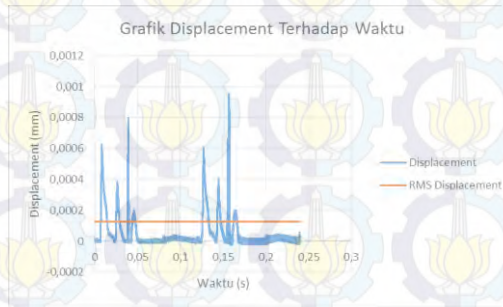
Dari simulasi ini diperoleh respon *multilayer piezoelectric* berupa daya yang dihasilkan, kuat arus dan *displacement* dari

*piezoelectric*. Kemudian dengan menggunakan *software microsoft excel* kita memperoleh grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu, kuat arus terhadap waktu dan *displacement piezoelectric* terhadap waktu.

#### 4.1.2.2 HASIL SIMULASI

##### 4.1.2.2.1 ANALISA GRAFIK DISPLACEMENT

**TERHADAP WAKTU (rpm = 1000,  $L_1=115,6$  mm dan  $\theta = 45^\circ$ )**



**Gambar 4.13** Grafik *Displacement multilayer piezoelectric* terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

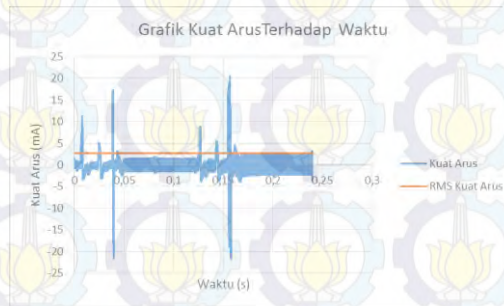
Dari gambar 4.13 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 0,000956 mm dan RMSnya 0,000127 mm. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.13 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula *displacement* yang



dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.24 dimana displacement berbanding lurus dengan gaya eksitasi ( $F_a$ ).

#### 4.1.2.2.2 ANALISA GRAFIK KUAT ARUS YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU ( $\text{rpm} = 1000$ , $L_1 = 115,6 \text{ mm}$ dan $\theta = 45^\circ$ )

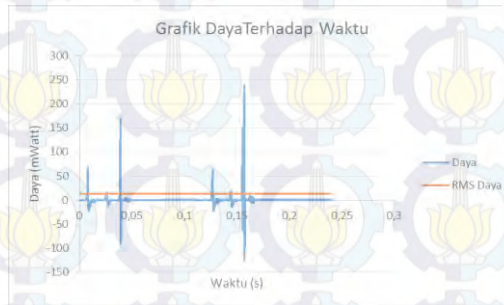


**Gambar 4.14** Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

Dari gambar 4.14 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 21,818 mA dan RMSnya 2,697 mA. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.14 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.22 dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. Sehingga jika *displacement* membesar maka kuat arus membesar. Sedangkan *displacement* semakin besar jika gaya eksitasi semakin besar.

#### 4.1.2.2.3 ANALISA GRAFIK DAYA YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, L1=115,6 mm dan $\theta = 45^\circ$ )



**Gambar 4.15** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

Dari gambar 4.15 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 238,938 mWatt dan RMSnya 13,032 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.15 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula daya yang dihasilkan ini sesuai dengan rumus daya ( $P = I^2/R$ ), dimana kuadrat kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga kuat arus membesar maka daya juga ikut membesar. Sedangkan kuat arus berbanding lurus dengan *displacement*, dan *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi.



Kemudian efisiensi dari model 2 dengan  $\theta = 45^\circ$  adalah

$$\eta = \frac{RMS P_{out}}{RMS P_{in}} \times 100\% = \frac{0,013032 \text{ Watt}}{17513,8108 \text{ Watt}} = 0,744 \cdot 10^{-4} \%$$

Catatan:

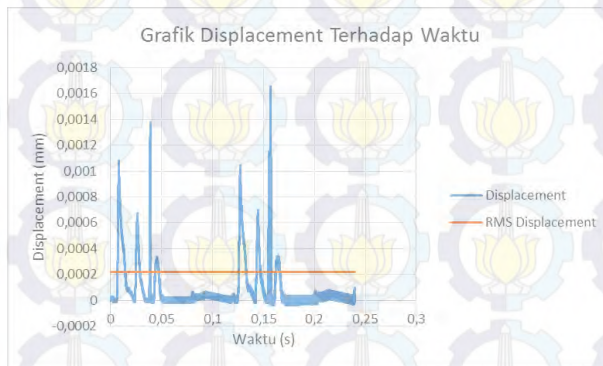
$$RMS P_{in} = RMS F_{eks} \cdot RMS v_{eks}$$

$$RMS F_{eks} = \text{RMS Gaya Eksitasi}$$

$$RMS v_{eks} = \text{RMS Kecepatan Eksitasi}$$

#### 4.1.2.2.4 ANALISA GRAFIK DISPLACEMENT

**TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, L1=115,6mm dan  $\theta = 60^\circ$ )**



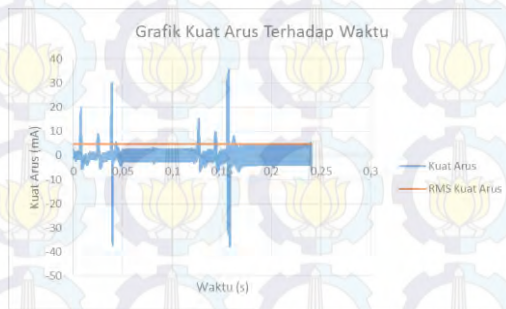
**Gambar 4.16** Grafik displacement multilayer piezoelectric yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.16 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya

adalah 0,001655 mm dan RMSnya 0,000219 mm. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.16 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula *displacement* yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.24 dimana *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi ( $F_a$ ).

#### 4.1.2.2.5 ANALISA GRAFIK KUAT ARUS YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, $L_1=115,6\text{mm}$ dan $\theta = 60^\circ$ )



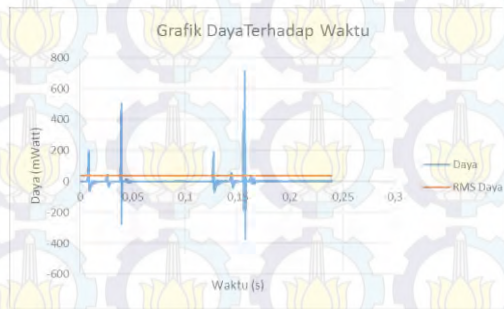
**Gambar 4.17** Grafik Kuat Arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.17 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 37,816 mA dan RMSnya 4,671 mA. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.17 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari

getaran mesin maka semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.22 dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. Sehingga jika *displacement* membesar maka kuat arus membesar. Sedangkan *displacement* semakin besar jika gaya eksitasi semakin besar.

#### 4.1.2.2.6 ANALISA GRAFIK DAYA YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, L1=115,6mm dan $\theta = 60^\circ$ )



**Gambar 4.18** Grafik Daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.18 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 716,693 mWatt dan RMSnya 39,09 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.18 dibandingkan dengan gambar 4.11 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula daya yang dihasilkan ini sesuai dengan rumus daya ( $P = I^2/R$ ), dimana kuadrat kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga kuat arus membesar maka

daya juga ikut membesar . Sedangkan kuat arus berbanding lurus dengan *displacement*, dan *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi.

Kemudian efisiensi dari model 2 dengan  $\theta = 60^\circ$  adalah

$$\eta = \frac{RMS P_{out}}{RMS P_{in}} \times 100\% = \frac{0,03909 \text{ Watt}}{17513,8108 \text{ Watt}} = 2,232 \cdot 10^{-4} \%$$

Catatan:

$$RMS P_{in} = RMS F_{eks} \cdot RMS v_{eks}$$

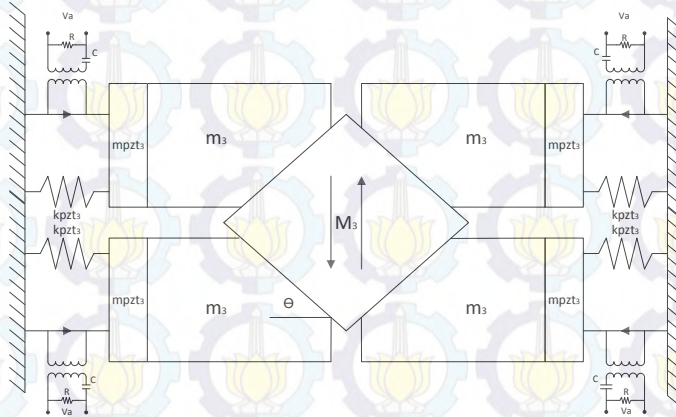
$$RMS F_{eks} = \text{RMS Gaya Eksitasi}$$

$$RMS v_{eks} = \text{RMS Kecepatan Eksitasi}$$

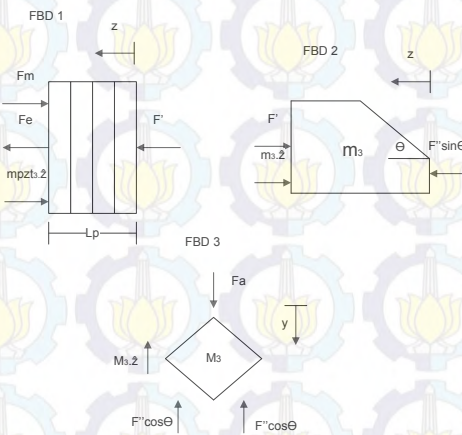


### 4.1.3 MODEL 3

#### 4.1.3.1 MEKANISME MODEL 3 ( $\theta = 45^\circ$ atau $\theta = 60^\circ$ )



Gambar 4.19 Model 3



Gambar 4.20 Keseimbangan Gaya pada Model 3



Analisa gaya pada model 3 adalah sama dengan model 2 hanya saja bedanya adalah besar variabel inputan dan saat massa M bergerak keatas, maka sistem tetap menghasilkan energi listrik berbeda dengan model 1 dan 2 yang hanya menghasilkan energi listrik saat massa M bergerak ke bawah.

Keseimbangan gayanya adalah

$$\tan \theta = z/y = \ddot{z}/\ddot{y} = F'' \sin \theta / F'' \cos \theta \quad \dots\dots\dots(4.31)$$

Dari FBD 1:

$$m_{pzt3}\ddot{z} = F' + F_e - F_m$$

$$m_{pzt3}\ddot{z} = F' + F_e - k_{pzt3}z \quad \dots\dots\dots(4.32)$$

Dari FBD 2:

$$m_3\ddot{z} = F'' \sin \theta - F' \quad \dots\dots\dots(4.33)$$

Dari FBD 3:

$$M_3\ddot{y} = F_a - 2F'' \cos \theta \quad \dots\dots\dots(4.34)$$

Substitusikan persamaan 4.33 ke persamaan 4.32

$$m_{pzt3}\ddot{z} = F'' \sin \theta - m_3\ddot{z} + F_e - k_{pzt3}z \quad \dots\dots\dots(4.35)$$

Masukkan persamaan 4.31 ke dalam persamaan 4.34

$$M_3 \frac{\ddot{z}}{\tan \theta} = F_a - 2F'' \frac{\sin \theta}{\tan \theta} \quad \dots\dots\dots(4.36)$$

Masukkan persmaan 4.35 ke persamaan 4.36

$$M_3 \frac{\ddot{z}}{\tan \theta} = F_a - \frac{2(m_{pzt3}\ddot{z} + m_3\ddot{z} - F_e + k_{pzt3}z)}{\tan \theta}$$

$$\frac{M_3}{\tan \theta} \ddot{z} + \frac{2m_{pzt3}}{\tan \theta} \ddot{z} + \frac{2m_3}{\tan \theta} \ddot{z} = \frac{F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt3}z}{\tan \theta}$$

$$(M_3 + 2m_{pzt3} + 2m_3)\ddot{z} = F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt3}z$$

$$M_T \ddot{z} = F_a \tan \theta + 2F_e - 2k_{pzt3}z \quad \dots\dots\dots(4.37)$$

dimana :

$$M_T = M_3 + 2m_{pzt3} + 2m_3 \quad \dots\dots\dots(4.38)$$

Analisa elektrik dari *multilayer piezoelectric* adalah

$$V_{(t)} - V_{C(t)} = V_{R(t)}$$

$$\frac{NZ_{(t)}}{C} - \frac{Q_{(t)}}{C} = \dot{Q}_{(t)}R \quad \dots\dots\dots(4.39)$$

Dimana:

$$N = \frac{d_{33}YA}{L_p} \quad \dots\dots\dots(4.40)$$

Kemudian persamaan 4.37 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$(M_T s^2 + 2k_{pzt3}) z(s) = F_a(s) \tan \theta + 2NV_{(s)}$$

$$z(s) = \frac{F_a(s) \tan \theta}{(M_T s^2 + 2k_{pzt3})} + \frac{2N}{(M_T s^2 + 2k_{pzt3})} V_{(s)} \dots\dots\dots(4.41)$$

$$z(s) = G_1(s)F_a(s) + G_2(s)V_{(s)}$$

$$G_1(s) = \frac{\tan \theta}{M_T s^2 + 2k_{pzt3}} \quad \dots\dots\dots(4.42)$$

$$G_2(s) = \frac{2N}{M_T s^2 + 2k_{pzt3}} \quad \dots\dots\dots(4.43)$$

Dari persamaan 4.39 diketahui bahwa

$$V(t) = \frac{N}{C} z(t) \quad \dots\dots\dots (4.44)$$

Dari persamaan 4.44 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$V(s) = \frac{N}{C} z(s)$$

$$V(s) = G_{3(s)} z(s)$$

$$G_{3(s)} = \frac{N}{C} \quad \dots\dots\dots (4.45)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan 4.44 ke persamaan 4.39 diperoleh

$$V(t) - \frac{Q(t)}{C} = \dot{Q}(t)R \quad \dots\dots\dots (4.46)$$

Lalu persamaan 4.46 dibentuk kedalam persamaan Transformasi Laplace

$$V(s) = Q(s) \left( \frac{1}{C} + Rs \right)$$

$$Q(s) = G_{4(s)} V(s)$$

$$G_{4(s)} = \frac{1}{1/C + Rs} \quad \dots\dots\dots (4.47)$$

Dibuat Blok diagram sebagai berikut:



*Gambar 4.21 Blok diagram dari model 3*

Dengan menggunakan simulink blok diagram dibuat dan dimasukkan variabel- variabel berikut:

$$\theta = 45^\circ$$

$$d_{33} = 47 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$Y = 4,9 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$A = 0,00045 \text{ m}^2$$

$$t = 0,000111 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{33}^T = 1,885 \cdot 10^{-8}$$

$$\rho_{pzt} = 7,65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$n = 10$$

$$\rho_{besi} = 7874 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{besi(m_3)} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{besi(M_3)} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$



$$N = \frac{d_{33}YA}{tn} = \frac{47 \cdot 10^{-12} \times 4,9 \cdot 10^{10} \times 0,00045}{0,000111 \times 10} = 9,3762$$

$$k_{pzt3} = \frac{YA}{tn} = \frac{4,9 \cdot 10^{10} \times 0,00045}{0,000111 \times 10} = 1,9865 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$$

$$m_{pzt3} = \rho_{pzt} Ant = 7,65 \cdot 10^3 \times 0,00045 \times 10 \times 0,000111 = 0,0038 \text{ kg}$$

$$m_3 = \rho_{besi} V_{besi(m_3)} = 7874 \times 3 \cdot 10^{-6} = 0,0236 \text{ kg}$$

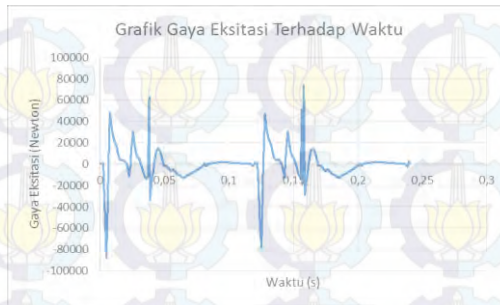
$$M_3 = \rho_{besi} V_{besi(M)} = 7874 \times 26 \cdot 10^{-6} = 0,2047 \text{ kg}$$

$$M_T = M_3 + 2m_{pzt3} + 2m_3 = 0,2047 + 2(0,0038) + 2(0,0236) = 0,2596 \text{ kg}$$

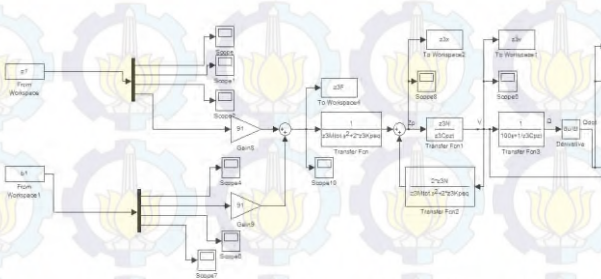
$$C = \frac{n\varepsilon_{33}^T A}{t} = \frac{10 \times 1,885 \cdot 10^{-8} \times 0,00045}{0,000111} = 7,6419 \cdot 10^{-7}$$

Catatan : Input gaya eksitasi diambil dari tugas akhir Karina Yulia yang berjudul, "*Pemodelan dan Analisa Getaran Motor Bensin 4 Langkah 2 Silinder 650cc Segaris Dengan Sudut Engkol  $0^\circ$  Untuk Rubber Mount*". Simulasi pertama saat kondisi rpm = 1000 dan L1=115,6mm dengan sudut besi pendorong  $\theta = 45^\circ$ . Sedangkan simulasi kedua dengan  $\theta = 60^\circ$ .





**Gambar 4.22** Grafik gaya eksitasi terhadap waktu

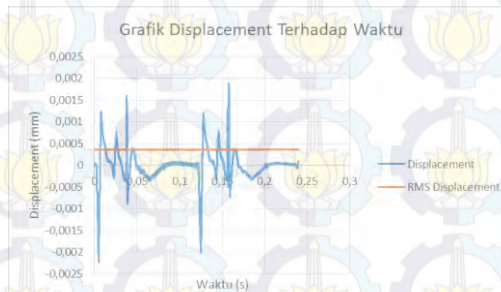


**Gambar 4.23** Blok diagram Simulink MATLAB model 3

Dari simulasi ini diperoleh respon *multilayer piezoelectric* berupa daya yang dihasilkan, kuat arus dan *displacement* dari *piezoelectric*. Kemudian dengan menggunakan *software microsoft excel* kita memperoleh grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu, kuat arus terhadap waktu dan *displacement piezoelectric* terhadap waktu.

### 4.1.3.2 HASIL SIMULASI

#### 4.1.3.2.1 ANALISA GRAFIK DISPLACEMENT TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, L1=115,6 mm dan $\theta = 45^\circ$ )



**Gambar 4.24** Grafik displacement multilayer piezoelectric terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

Dari gambar 4.24 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 0,002243 mm dan RMSnya 0,000364 mm. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.24 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula *displacement* yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.41 dimana displacement berbanding lurus dengan gaya eksitasi ( $F_a$ ).

#### 4.1.3.2.2 ANALISA GRAFIK KUAT ARUS YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, $L1=115,6$ mm dan $\theta = 45^\circ$ )

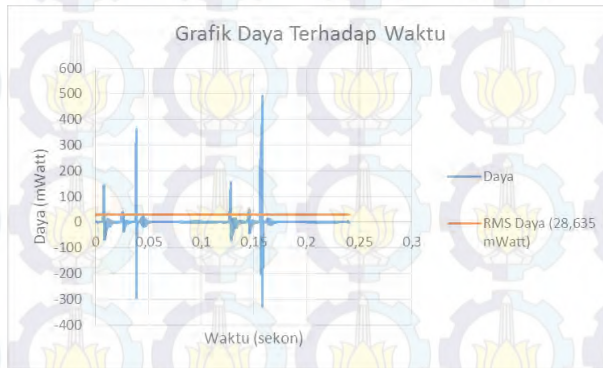


**Gambar 4.25** Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

Dari gambar 4.25 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 35,211 mA dan RMSnya 4,251 mA. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.25 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.39 dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. Sehingga jika *displacement* membesar maka kuat arus membesar. Sedangkan *displacement* semakin besar jika gaya eksitasi semakin besar.

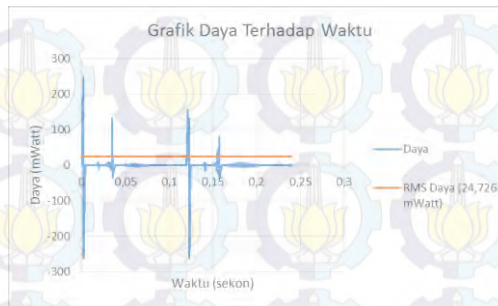
#### 4.1.3.2.3 ANALISA GRAFIK DAYA YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, $L_1=115,6$ mm dan $\theta = 45^\circ$ )



**Gambar 4.26** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$  dengan gaya eksitasi bernilai positif

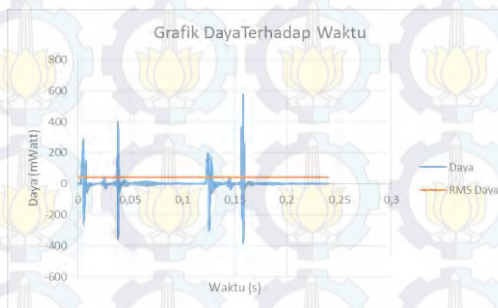
Dari gambar 4.26 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah RMSnya 28,635 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.





**Gambar 4.27** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$  dengan gaya eksitasi bernilai negatif

Dari gambar 4.27 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah RMSnya 24,726 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.



**Gambar 4.28** Grafik gabungan daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 45^\circ$

Dari gambar 4.28 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 578,111 mWatt dan RMSnya 41,326 mWatt. Gelombang 1



bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2. Sedangkan dari gambar 4.26 dan 4.27 terlihat bahwasanya RMSnya 28,635 mWatt dan 24,726 mWatt yang jika dijumlahkan bernilai 53.361 mWatt. Sehingga nilai RMS gabungan dengan RMS yang dihasilkan oleh *software* memiliki perbedaan sebesar 12.035 mWatt. Hal ini disebabkan pada mekanisme gabungan adanya respon yang saling tolak menolak (berlawanan arah) sehingga terjadinya pengurangan respon yang dihasilkan.

Jika gambar 4.28 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula daya yang dihasilkan ini sesuai dengan rumus daya ( $P = I^2/R$ ), dimana kuadrat kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga kuat arus membesar maka daya juga ikut membesar. Sedangkan kuat arus berbanding lurus dengan *displacement*, dan *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi.

Kemudian efisiensi dari model 3 dengan  $\theta = 45^\circ$  adalah

$$\eta = \frac{RMS P_{out}}{RMS P_{in}} \times 100\% = \frac{0,041326 \text{ Watt}}{17513,8108 \text{ Watt}} = 2,360 \cdot 10^{-4} \%$$

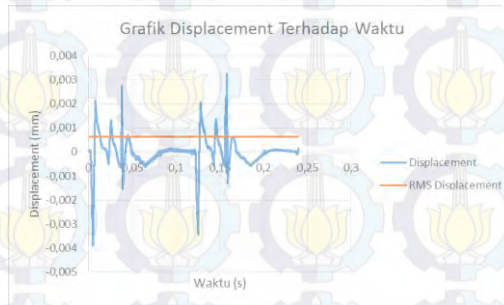
Catatan:

$$RMS P_{in} = RMS F_{eks} \cdot RMS v_{eks}$$

$$RMS F_{eks} = \text{RMS Gaya Eksitasi}$$

$$RMS v_{eks} = \text{RMS Kecepatan Eksitasi}$$

#### 4.1.3.2.4 ANALISA GRAFIK DISPLACEMENT TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, $L_1=115,6\text{mm}$ dan $\theta = 60^\circ$ )



**Gambar 4.29** Grafik displacement multilayer piezoelectric yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.27 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 0,003884 mm dan RMSnya 0,000631 mm. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.27 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula *displacement* yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.41 dimana displacement berbanding lurus dengan gaya eksitasi ( $F_a$ ).

#### 4.1.3.2.5 ANALISA GRAFIK KUAT ARUS YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = 1000, $L_1=115,6\text{mm}$ dan $\theta = 60^\circ$ )



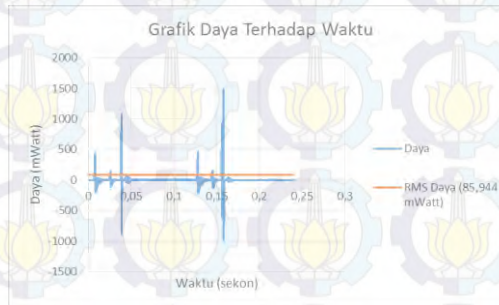
**Gambar 4.30** Grafik kuat arus yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.28 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 60,918 mA dan RMSnya 7,325 mA. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.28 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan ini sesuai dengan persamaan 4.39 dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. Sehingga jika *displacement* membesar maka kuat arus membesar. Sedangkan *displacement* semakin besar jika gaya eksitasi semakin besar.

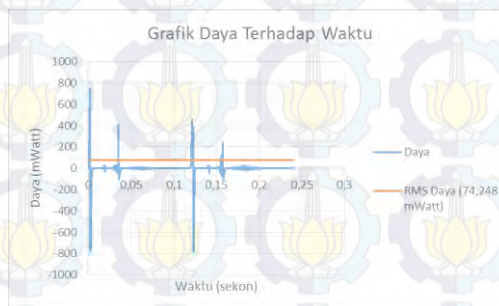


#### 4.1.3.2.6 ANALISA GRAFIK DAYA YANG DIHASILKAN TERHADAP WAKTU (rpm = (rpm = 1000, L1=115,6mm dan $\theta = 60^\circ$ )



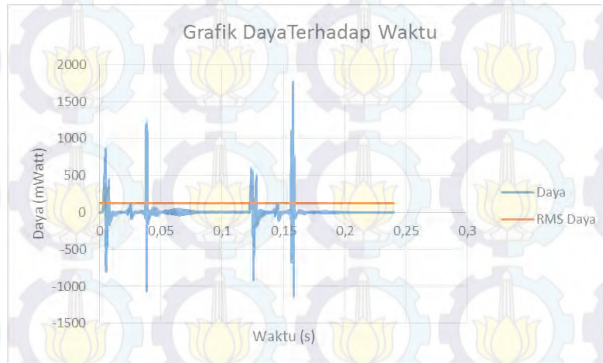
**Gambar 4.31** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$  dengan gaya eksitasi bernilai positif

Dari gambar 4.31 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah RMSnya 85,944 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.



**Gambar 4.32** Grafik daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$  dengan gaya eksitasi bernilai negatif

Dari gambar 4.32 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah RMSnya 74,248 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.



**Gambar 4.33** Grafik gabungan daya yang dihasilkan terhadap waktu untuk  $\theta = 60^\circ$

Dari gambar 4.33 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya adalah 578,111 mWatt dan RMSnya 124,095 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2. Sedangkan dari gambar 4.31 dan 4.32 terlihat bahwasanya RMSnya 85,944 mWatt dan 74,248 mWatt yang jika dijumlahkan bernilai 160,192 mWatt. Sehingga nilai RMS gabungan dengan RMS yang dihasilkan oleh *software* memiliki perbedaan sebesar 36,097 mWatt. Hal ini disebabkan pada mekanisme gabungan adanya respon yang saling tolak menolak (berlawanan arah) sehingga terjadinya pengurangan respon yang dihasilkan.

Dari gambar 4.29 terlihat bahwa dalam waktu 0,24s terdapat kurang lebih 2 gelombang dimana nilai maksimumnya



adalah 1762,995 mWatt dan RMSnya 124,095 mWatt. Gelombang 1 bernilai lebih kecil dari pada gelombang ke 2.

Jika gambar 4.29 dibandingkan dengan gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar percepatan (semakin besar gaya eksitasi yang diberikan kepada *multilayer piezoelectric*) dari getaran mesin maka semakin besar pula daya yang dihasilkan ini sesuai dengan rumus daya ( $P = I^2/R$ ), dimana kuadrat kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga kuat arus membesar maka daya juga ikut membesar. Sedangkan kuat arus berbanding lurus dengan *displacement*, dan *displacement* berbanding lurus dengan gaya eksitasi.

Kemudian efisiensi dari model 3 dengan  $\theta = 60^\circ$  adalah

$$\eta = \frac{RMS P_{out}}{RMS P_{in}} \times 100\% = \frac{0,124095 \text{ Watt}}{17513,8108 \text{ Watt}} = 7,085 \cdot 10^{-4} \%$$

Catatan:

$$RMS P_{in} = RMS F_{eks} \cdot RMS v_{eks}$$

$$RMS F_{eks} = \text{RMS Gaya Eksitasi}$$

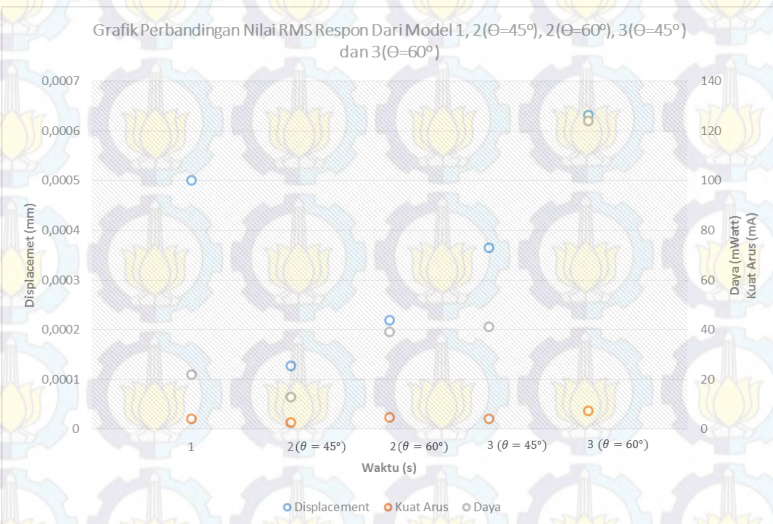
$$RMS v_{eks} = \text{RMS Kecepatan Eksitasi}$$

## 4.2 PEMBAHASAN

### 4.2.1 ANALISA PERBANDINGAN RESPON (RMS) YANG DIHASILKAN OLEH MODEL 1, 2 DAN 3

NO	Model	RMS Displacement (mm)	RMS Kuat Arus (mA)	RMS Daya (mWatt)
1	1	0,000500	4,150	21,910
2	2 ( $\theta = 45^\circ$ )	0,000127	2,697	13,032
3	2 ( $\theta = 60^\circ$ )	0,000219	4,671	39,090
4	3 ( $\theta = 45^\circ$ )	0,000364	4,251	41,326
5	3 ( $\theta = 60^\circ$ )	0,000631	7,325	124,095

**Tabel 4.1** Tabel Perbandingan Respon yang Dihasilkan oleh Model 1,2 dan 3



**Gambar 4.34** Grafik perbandingan nilai RMS respon dari model 1,2( $\theta = 45^\circ$ ),2( $\theta = 60^\circ$ ),3( $\theta = 45^\circ$ ) dan 3( $\theta = 60^\circ$ )

### - **Respon Displacement**

Dari gambar 4.30 terlihat bahwa nilai RMS displacement terbesar adalah model 3 ( $\theta = 60^\circ$ ) yaitu 0,000631 mm. Kemudian model 1 RMS displacementnya nomor 2 terbesar, yaitu 0,000500 mm. Sedangkan RMS displacement model 3 ( $\theta = 45^\circ$ ) nomor 3 terbesar, yaitu 0,000364 mm. Untuk model 2 untuk  $\theta = 45^\circ$  dan  $\theta = 60^\circ$  memiliki displacement paling rendah 0,000127 mm dan 0,000219 mm.

Berdasarkan pemodelan mekanis, seharusnya model 1 memiliki displacement terbesar jika dibandingkan dengan model 2 dan 3 karena model 1 langsung menerima gaya eksitasi secara tegak lurus dengan luas permukaan piezoelektrik. Hal ini terjadi karena model 1 hanya menerima gaya yang bernilai positif. Sedangkan model 3 seharusnya memiliki RMS displacement lebih rendah dari pada model 1, karena model 3 menerima gaya eksitasi yang sudah direduksi dengan sudut besi pendorong ( $\theta$ ). Tetapi karena model 3 menerima gaya eksitasi yang bernilai positif dan negatif sehingga nilai RMSnya menjadi lebih besar. Akan tetapi ini hanya untuk  $\theta = 60^\circ$ , untuk  $\theta = 45^\circ$  reduksi gaya eksitasinya terlalu besar sehingga walaupun model 3 menerima gaya eksitasi yang bernilai positif dan negatif tetap saja RMS displacementnya lebih rendah dari model 1. Kemudian untuk model 2 untuk  $\theta = 45^\circ$  dan  $\theta = 60^\circ$  memang seharusnya yang paling kecil RMS displacementnya karena selain gaya eksitasi direduksi dengan adanya sudut besi pendorong ( $\theta$ ), model 2 hanya menerima gaya eksitasi yang bernilai positif.

### - **Respon Kuat Arus**

Dari gambar 4.30 terlihat bahwa nilai RMS kuat arus terbesar adalah model 3 ( $\theta = 60^\circ$ ) yaitu 7,325 mA.



Kemudian nilai RMS kuat arus nomor 2 dan nomor 3 terbesar adalah model 2 ( $\theta = 60^\circ$ ) dan model 3 ( $\theta = 45^\circ$ ) sebesar 4,671 mA dan 4,251 mA. Lalu model 1 nomor 4 terbesar, nilai RMS kuat arusnya 4,150 mA. Sedangkan model 2 ( $\theta = 45^\circ$ ) yang nilai RMS kuat arusnya paling kecil adalah 2,697 mA.

Hal ini tidak sesuai dengan  $\frac{Nz(t)}{c} - \frac{Q(t)}{c} = \dot{Q}(t)R$  dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus. *Displacement* yang besar akan menyebabkan kuat arus yang besar juga.

#### **Respon Daya**

Dari gambar 4.30 terlihat bahwa nilai RMS daya terbesar adalah model 3 ( $\theta = 60^\circ$ ) yaitu 124,095 mWatt. Kemudian model 3 ( $\theta = 45^\circ$ ) sebesar 41,326 mWatt. Lalu model 2 dengan  $\theta = 60^\circ$  sebesar 39,09 mWatt dan model 1 sebesar 21,91 mWatt. Sedangkan yang paling kecil adalah model 2 dengan  $\theta = 45^\circ$  sebesar 13,032 mWatt.

Hal ini tidak sesuai dengan persamaan dan  $(P = I^2/R)$ , dimana *displacement* berbanding lurus dengan kuat arus, dan kuat arus berbanding lurus dengan daya. Sehingga yang paling berpengaruh dari model ini terhadap daya yang dihasilkan adalah kemampuan mekanisme untuk memanfaatkan gaya eksitasi yang ada. Dari gambar 4.30 juga terlihat perbandingan *displacement* dengan daya yang paling baik adalah model dengan  $\theta = 60^\circ$ , artinya defleksi yang terjadi pada mekanisme model, menghasilkan daya yang paling besar.

## - Perbandingan Efisiensi

Model	1	2 ( $\theta = 45^\circ$ )	2 ( $\theta = 60^\circ$ )	3 ( $\theta = 45^\circ$ )	3 ( $\theta = 60^\circ$ )
Efisiensi (%)	1,251. $10^{-4}$	0,744. $10^{-4}$	2,232. $10^{-4}$	2,360. $10^{-4}$	7,085. $10^{-4}$

**Tabel 4.2** *Tabel Perbandingan Efisiensi Dari Mekanisme Model 1,2 dan 3*

Dari tabel 4.2 terlihat bahwasanya mekanisme yang memiliki efisiensi terbesar adalah model 3, baik itu dengan  $\theta = 45^\circ$  maupun dengan  $\theta = 60^\circ$ . Hal itu dikarenakan model 3 mampu mengkonversi gaya eksitasi yang berarah ke bawah maupun ke atas. Sedangkan model 2 dengan  $\theta = 60^\circ$  memiliki efisiensi yang lebih besar dari pada model 1, hal ini dikarenakan  $\tan \theta = 60^\circ$  lebih besar nilainya dari 1, sehingga gaya yang diberikan kepada piezoelectric menjadi lebih besar dari model 1. Sedangkan untuk model 2 dengan  $\theta = 45^\circ$  memiliki efisiensi yang lebih kecil dari pada model 1, hal ini dikarenakan  $\tan \theta = 45^\circ$  lebih kecil dari 1, sehingga gaya yang diberikan kepada piezoelectric menjadi lebih kecil dari model 1. Hubungan ini sesuai dengan persamaan 4.20.



---

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 KESIMPULAN

1. Pembuatan sudut kemiringan pada besi pendorong dapat minimalis displacement yang akan dialami oleh multilayer piezoelectric, sehingga multilayer piezoelectric relatif lebih aman terhadap gaya eksitasi yang diterimanya jika dibandingkan model yang multilayer piezoelectricnya langsung menerima gaya eksitasi secara tegak lurus.
2. Pembuatan model dengan  $\theta = 60^\circ$  menghasilkan daya yang lebih besar dari model dengan  $\theta = 45^\circ$ .
3. Pembuatan model 3 dengan sudut kemiringan dengan  $\theta = 60^\circ$  adalah model yang paling besar menghasilkan daya dan displacement dengan model yang lain, karena model 3 mampu memanfaatkan gaya eksitasi lebih maksimal.
4. Kuat arus yang dihasilkan oleh mekanisme tidak berpengaruh secara signifikan terhadap daya yang ada.
5. Efisiensi terbesar dimiliki oleh model 3 dikarenakan model 3 mampu memanfaatkan gaya eksitasi lebih maksimal.

#### 5.2 SARAN

1. Untuk simulasi berikutnya dibutuhkan gaya eksitasi yang jauh lebih lama (dalam tugas akhir ini gaya eksitasi yang terjadi hanya sebesar 0,24 s) dan lebih stabil.
2. Untuk simulasi berikutnya digunakan gaya eksitasi pada engine yang sedang dikenakan beban (tidak *steady*).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## DAFTAR PUSTAKA

- D. Dimargonas, Andrew, “**Vibration for Engineers**”, Prentice Hall PTR, New jersey, 2002.
- Erturk, Alper. Daniel J. Inman, “**Piezoelectric Energy Harvesting**”, John Wiley & Sons, 2011
- Priya, Shashank. Daniel J. Inman, “**Energy Harvesting Technologies**”, Springer Science+Business Media, 2009
- S. Rao, Singiresu, “**Mechanical Vibration**”, Prentice Hall PTR, Singapore, 2004.
- Tichi, Jan, “**Fundamental of Piezoelectric Sensorics**”, Springer Science+Business Media, Boston, 2010
- Yang, Jiashi, “**An Introduction To The Theory of Piezoelectricity**”, Springer Science+Business Media Inc., Boston. 2005.

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis, Gandha Hafesha adalah anak ketiga dari empat bersaudara, yang lahir pada 13 Februari 1992 di Bukittinggi. Penulis memulai pendidikannya dari TK Bayangkari kemudian diteruskan ke jenjang selanjutnya di SD 09 Pakan Kurai. Lalu penulis melanjutkan jenjang pendidikannya ke SMPS Xaverius pada tahun 2003. Pada tahun 2006 penulis meneruskan pendidikannya di SMAN 5 Bukittinggi. Penulis melanjutkan studinya ke jenjang perkuliahan pada tahun 2009 di Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya. Di kampus inilah penulis mulai hidup jauh dari orangtua sehingga mendapatkan banyak pengalaman dan ilmu yang berharga sebagai bekal menjalani kehidupan. Kemandirian yang harus dijalani ketika kuliah turut membentuk karakter dan kepribadian penulis. Semasa duduk dibangku kuliah, penulis aktif di beberapa organisasi, diantaranya UKM taekwondo dan LBMM. Dengan kelulusannya, penulis memiliki obsesi untuk membangun industri yang dapat menyerap tenaga kerja yang berkualitas dari negeri sendiri.